



Contribution à l'étude de la santé-matière de préformes carbone

Adrienne Leca

► To cite this version:

Adrienne Leca. Contribution à l'étude de la santé-matière de préformes carbone. Mécanique des matériaux [physics.class-ph]. Université du Havre, 2015. Français. NNT: 2015LEHA0016 . tel-01255036

HAL Id: tel-01255036

<https://theses.hal.science/tel-01255036>

Submitted on 13 Jan 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Thèse de doctorat

Présentée et soutenue le 21 septembre 2015

par

Adrienne LECA

Pour obtenir le

Doctorat de l'Université du Havre

Spécialité : Mécanique des matériaux

**Contribution à l'étude de la santé matière
de préformes carbone**

- Version pour diffusion -

Jury :

Mme Laurence SCHACHER
Mme Emmanuelle VIDAL-SALLE
Mr Moussa GOMINA

Professeur, ENSISA, Mulhouse (Présidente)
Professeur, INSA Lyon (Rapporteur)
Chargé de Recherche-HdR, CNRS, Caen (Rapporteur)

Mr Damien SOULAT
Mr Arnaud DELEHOUZE
Mr Xavier LEGRAND
Mr Joël BREARD

Professeur, ENSAIT, Roubaix (Examineur)
Dr-Ingénieur, Aircelle Groupe Safran, (Invité, co-encadrant)
Maître de conférences-HdR, ENSAIT, Roubaix (Co-directeur de thèse)
Professeur, Université du Havre (Directeur de thèse)

Remerciements

En tout premier lieu, je voudrais remercier la société Aircelle, du groupe Safran, d'avoir financé cette étude.

Merci à Joël Bréard d'avoir accepté de diriger cette thèse. Nos discussions ont toujours été une source de motivation. Tant sur le plan humain que scientifique, je garderai un beau souvenir de notre collaboration.

Merci à Xavier Legrand, qui m'a suivie et encadrée au cours de ces trois années, pour sa bonne humeur et sa disponibilité.

Je voudrais tout particulièrement remercier Arnaud Delehouzé, de la société Aircelle, pour son aide précieuse et ses conseils avisés. Son investissement et son impressionnante capacité de travail sont des exemples pour moi. C'est à ses côtés que j'ai réellement découvert le goût de la recherche, de l'industrie, et le sens de la curiosité. Merci énormément pour tous nos échanges qui ont toujours été une source d'inspiration.

Je remercie très chaleureusement Laurence Schacher, Professeur à l'ENSISA, d'avoir accepté de présider le jury de cette thèse. Un immense merci à Emmanuelle Vidal-Sallé, Professeur à l'INSA Lyon, et à Moussa Gomina, Chargé de Recherche-HdR au CNRS, pour leurs remarques particulièrement enrichissantes, en qualité de rapporteurs. Merci à Damien Soulat, Professeur à l'ENSAIT, d'avoir accepté de faire partie de ce jury et d'y avoir apporté son éclairage pertinent.

Merci à tous ceux qui à moment ou à un autre, m'ont permis d'avancer dans ma réflexion. Je pense notamment à Julien Bardy, qui a initié ces travaux de thèse, et nous a quitté prématurément pour voguer vers de nouvelles aventures. Merci également à Florent Dominé, de la société Aircelle, pour son expertise.

Merci également à tous mes collègues de laboratoire, d'avoir égayé ma vie de doctorante. Je pense particulièrement à Boris Duchamp, Ahmed Labanieh, mes colocataires de bureau, Nicolas Trifigny, Jérôme Vilfayeau, Jean-Vincent Risicato, Fern Kelly, Vanessa Pasquet. Merci à François Dassonville pour ses bons petits plats.

Merci également à Marcel Duchamp, Claude Bocquet, Dimitri Costanza et Nicolas Dumont, pour leur aide dans les moments de panique mécanique !

Je voudrais remercier tout particulièrement Bastien Tranquart, de m'avoir redonné un second souffle, me permettant de mener à son terme ce travail de thèse.

Un immense merci à Maxime Kowalski. Il n'y a pas de mots assez forts pour exprimer toute ma reconnaissance. Je n'oublierai jamais les longues heures passées à bricoler sur le banc de test, mais aussi à se balader en 106 ! Je n'aurais jamais tenu ces trois années de thèse sans notre magnifique amitié.

Merci à ma famille pour son soutien. Ma maman, pour son optimisme et sa bonne humeur permanente. Mon frère, pour sa patience à tous les repas où nous ne parlions que d'indicateurs morphologiques ! Et enfin, Nolwenn Baez, mon amie de toujours, qui a toujours été présente à mes côtés dans les moments de doute.

Enfin, je garde le meilleur pour la fin, en remerciant mon meilleur soutien, mon arme secrète, mon guide, mon conseiller, mon modèle : mon papa, Francis Leca, sans qui je ne serais jamais arrivée là où j'en suis aujourd'hui. Je le remercie du fond du cœur.

Glossaire

CMO. Composite à matrice organique.

Filament. Fibre textile de très grande longueur, dite continue.

Fibre. Élément caractérisé par sa flexibilité, sa finesse, sa grande longueur par rapport à son diamètre (ou par rapport à la plus grande dimension de sa section transversale), qui le rende apte à des applications textiles. Dans la suite du manuscrit, les deux termes **Fibre** et **Filament** seront confondus.

Fil. Ensemble de faible section et de très grande longueur, formé de filaments continus ou de fibres discontinues, maintenues ensemble par torsion.

Filé de fibres. Assemblage de fibres courtes, maintenues entre elles par friction ou torsion.

Foule. Ouverture entre les nappes de fils de chaîne qui permet l'insertion de la trame.

HM. Haut module.

HR. Haute résistance.

IM. *Intermediate modulus.* Module intermédiaire.

Mèche. Assemblage de quelques milliers de filaments, éventuellement maintenus par une légère torsion ou friction.

Micropores. Espaces localisés entre les fibres d'une mèche.

Macropores. Espaces localisés entre les mèches d'une préforme.

NCF. *Non Crimp Fabric* (Tissus unidirectionnels consolidés par aiguilletage).

Renfort. Ensemble de fibres qui assurent la résistance aux efforts et participent à la rigidité d'un matériau composite.

Tex. Unité de mesure de masse linéique.

THM. Très haut module.

Tissu. Etoffe formée par l'entrecroisement généralement perpendiculaire de deux ensembles de fils.

Tresse. Cordage obtenu par entrelacement de deux groupes égaux de faisceaux de fils ou de duites appelés fuseaux. L'un des groupes est tressé dans le sens « S », l'autre dans le sens « Z ».

US. Acronyme d'ultrasons.

USB. Acronyme de « Unité structurale de base ».

Table des figures

Figure 1-1 Echelles caractéristiques du renfort à base de fibres de carbone	27
Figure 1-2 Réaction de polymérisation de l'acrylonitrile	29
Figure 1-3 Procédé de fabrication des fibres ex-PAN [4].....	30
Figure 1-4 Microstructure de la fibre de carbone ex-PAN proposée par Johnson [4].....	32
Figure 1-5 Microtexture d'une fibre de carbone haute résistance proposée par Guigon [12]	33
Figure 1-6 Principaux types d'architectures textiles de renfort [22]	37
Figure 1-7 Différentes familles d'armures (visuels obtenus avec le logiciel WiseTex®)	38
Figure 1-8 Vue schématique de côté (a) et du dessus (b) d'un métier à tisser [25]	40
Figure 1-9 Les deux familles de tricotés [24]	40
Figure 1-10 Principe de fonctionnement d'une tresseuse horizontale [28]	41
Figure 1-11 Schéma d'une tresse [29]	42
Figure 1-12 Schéma du tressage en forme [29]	42
Figure 1-13 Exemples de stratifiés [31]	43
Figure 1-14 (a) Rupture de fibre en traction [33] (b) Rupture de fibre en compression [34]	43
Figure 1-15 Différents types de liage interlock.....	44
Figure 1-16 Tressage carré [22]	45
Figure 1-17 Tricotage multicouche [29]	45
Figure 1-18 Différents types de dégradation d'un matériau composite à renfort fibreux [37]	46
Figure 1-19 Modélisation de la fibre sous la forme d'un assemblage de maillons	47
Figure 1-20 Fonction de répartition de Weibull	49
Figure 1-21 Evolution de l'endommagement d'un composite quartz-époxy sous contrainte, observée par tomographie à rayons X [41]	50
Figure 1-22 Faciès de rupture fibre graphitisée/epoxy [42]	50
Figure 1-23 Observations au MEB des faciès de rupture dans les composites tissés chanvre/epoxy [44] [0/90]° : endommagements des renforts fils de chanvre (1a,1b), matriciels (2a,2b), à l'interface renfort/matrice (3a,3b,3c).	51
Figure 1-24 Schéma de fonctionnement d'un tomographe industriel à rayon X [45]	52
Figure 1-25 Sections de mèche de renfort d'un tissu toile, observées avec une résolution de 2,85 µm à 5 µm [46]	53
Figure 1-26 Vues en coupe d'un composite quartz/epoxy fracturé obtenues par tomographie à rayons X [41]	54

Figure 1-27 Comportement schématique d'un composite Carbone/époxy en traction.....	56
Figure 1-28 Exemples de défauts sur un NCF (Non-Crimp Fabric) [50]	57
Figure 1-29 Principe de la détection de défauts par US par réflexion [54]	59
Figure 1-30 Schéma de fonctionnement de l'USTER TESTER 5-C800 [56].....	60
Figure 1-31 Fils capteurs [58].....	61
Figure 1-32 (a) Type d'éprouvettes testées (b) Densité de signaux de tous les essais réalisés dans le plan des descripteurs (temps de montée, amplitude) [59]	62
Figure 1-33 Dispositif de détermination de la pilosité développé par Bueno [60].....	62
Figure 1-34 Résultats du profilo-pilosimètre de Bueno et al. [60]	63
Figure 2-1 Domaine de définition de l'étude	68
Figure 2-2 Principe de l'ourdissage direct [63]	70
Figure 2-3 Principe de l'ourdissage sectionnel [63]	71
Figure 2-4 Fils insérés dans leur lice [64]	72
Figure 2-5 Principe du rentrage "suivi" et du rentrage "à pointe et retour".....	72
Figure 2-6 Diagramme ISHIKAWA récapitulatif des familles de paramètres influents sur la santé matière de la mèche de carbone	77
Figure 2-7 Hauteur de montée H, Longueur de cadres Lc, et hauteur de croisure h.....	80
Figure 2-8 Ouverture de foule (a) asymétrique (b) symétrique	81
Figure 2-9 Cycle de tissage.....	82
Figure 2-10 Hauteur de montée de cadre en fonction de la distance de tassage avec Lc = 57,6 cm et h = 3,0 cm	83
Figure 2-11 Différents cas de figure : faible tension et tension correcte des fils de chaîne.....	86
Figure 2-12 Œillet guidant le fil à la sortie d'une bobine [68]	87
Figure 2-13 Angles de sortie de fils de chaîne sur un cantre [68].....	87
Figure 2-14 Mèches de carbone 12K et 3K dans un œillet de taille identique	89
Figure 2-15 Notion d'espace expérimental.....	91
Figure 2-16 Schéma des paramètres procédés en fonction de leur mouvement.....	92
Figure 2-17 Exemple de diagramme de répartition d'une distribution de moyenne=700 et d'ecart-type=50 avec un seuil de signification alpha=0,05	95
Figure 2-18 Exemple de graphique des effets principaux sur la force maximale (N) pour la campagne "Cadres"	96
Figure 2-19 Exemple de diagramme des interactions sur la force maximale (N) pour la campagne "oeillets"	97
Figure 3-1 Schéma du principe de fonctionnement du banc de test	101

Figure 3-2 Photographie du banc de test.....	102
Figure 3-3 Diagramme SADT du banc de test	104
Figure 3-4 Diamètre apparent d et section A de la mèche.....	105
Figure 3-5 Structure théorique d'un fil torsadé [72]	106
Figure 3-6 Sollicitation de la mèche en traction.....	107
Figure 3-7 Mèche de carbone AS7 12K.....	108
Figure 3-8 Mèche de carbone AS7 12K après 20 passages à travers un œillet de porcelaine	108
Figure 3-9 Schéma d'une mèche dégradée et des critères caractéristiques de cette dégradation	109
Figure 3-10 Grandeurs caractéristiques de l'endommagement retenues.....	109
Figure 3-11 Protocole de caractérisation de l'endommagement par traitement et analyse d'images	111
Figure 3-12 Dispositif de réalisation des éprouvettes de mèches de carbone imprégnées sans talon.....	115
Figure 3-13 Schéma et photographie d'un montage avec mors à cabestan	116
Figure 3-14 Talon en aluminium (Dimensions en mm).....	118
Figure 3-15 Gabarit de collage.....	118
Figure 3-16 Mèches de carbone centrées	119
Figure 3-17 Profil type de courbe de traction « Force – Allongement » obtenue	120
Figure 3-18 Diagrammes de probabilité pour (a) la force maximale et (b) la force à rupture des mèches de carbone sèches avec talon en aluminium.....	122
Figure 3-19 Mèche de carbone avec filaments désalignés.....	124
Figure 4-1 Courbes de traction de 20 éprouvettes de référence	128
Figure 4-2 Petite longueur de jauge et grande longueur de jauge vis-à-vis de la taille de la fissure	128
Figure 4-3 Tests de traction sur multi-filamentaires de verre avec différentes longueurs de jauge. A gauche : données brutes. A droites : données corrigées en éliminant la déformation due aux talons époxy [79]	129
Figure 4-4 Critères de l'endommagement suivant le mode de caractérisation	132
Figure 4-5 Graphique des effets principaux pour la force max (N) - Campagne 1 : « Guide-Fils »	135
Figure 4-6 Diagramme des interactions pour force max (N) - Campagne 1 : « Guide-Fils »	135
Figure 4-7 Graphiques des effets principaux sur résultats morphologiques – Campagne 1 : « Guide-fils »	137

Figure 4-8 Graphique des effets principaux pour force max (N) – Campagne 2 : « Cinématique »	140
Figure 4-9 Diagramme des interactions pour force max (N) – Campagne 2 : « Cinématique »... 141	141
Figure 4-10 Graphiques des effets principaux sur résultats morphologiques – Campagne 2 : « Cinématique..... 143	143
Figure 4-11 Graphique des effets principaux pour force max (N) – Campagne 3 : « Matière - ensimage »	146
Figure 4-12 Diagramme des interactions pour force max (N) - Campagne 3 : « Matière – ensimage »	146
Figure 4-13 Morphologie de mèches – Campagne 3 : « Matière ensimage »..... 148	148
Figure 4-14 Graphique des effets principaux sur l'indicateur de filaments rompus – Campagne 3 : « Matière ensimage »..... 149	149
Figure 4-15 Graphique des effets principaux pour force max (N) : Campagne 4 : « Matière - titre »	151
Figure 4-16 Diagramme des interactions pour la force maximale (en N) – Campagne 4 : « Matière - titre »	152
Figure 4-17 Graphique des effets principaux sur l'indicateur de filaments rompus – Campagne 4 : « Matière titre »..... 153	153
Figure 4-18 Graphique des effets principaux pour force max (N) - Campagne 5 : « Cadres »..... 156	156
Figure 4-19 Diagramme des interactions pour force max (N) – Campagne 5 : « Cadres »..... 156	156
Figure 4-20 Graphique des effets principaux sur l'indicateur de filaments rompus – Campagne 5 : « Cadres »	157
Figure 4-21 Graphique des effets principaux pour force max (N) : Campagne 6 : « Peigne »..... 161	161
Figure 4-22 Diagramme des interactions pour force max (N) : Campagne 6 : « Peigne »..... 162	162
Figure 4-23 Graphique des effets principaux sur l'indicateur de filaments rompus – Campagne 6 :« Peigne »..... 163	163
Figure 4-24 Mèche de carbone ayant subi la configuration optimisée (a) et la configuration dégradée (b)..... 165	165
Figure 5-1 Représentation schématique du montage de traction [79]..... 175	175
Figure 5-2 Courbes de traction du lot de référence..... 175	175
Figure 5-3 Zoom sur la partie de mise en tension des courbes du lot de référence	175
Figure 5-4 Méthode de caractérisation des sur-longueurs par les déformations d'activation – Exemple de la Campagne 1 – Lot 7	176
Figure 5-5 Courbes de traction de la campagne 1 – Lot 1..... 177	177
Figure 5-6 Zoom sur la zone de mise en tension – Campagne 1- Lot 1	177
Figure 5-7 Courbes de traction de la campagne 1 – Lot 2..... 177	177

Figure 5-8 Zoom sur la zone de mise en tension– Campagne 1- Lot 2	177
Figure 5-9 Courbes de traction de la campagne 1 – Lot 3.....	178
Figure 5-10 Zoom sur la zone de mise en tension – Campagne 1- Lot 3.....	178
Figure 5-11 Courbes de traction de la campagne 1 – Lot 4	178
Figure 5-12 Zoom sur la zone de mise en tension – Campagne 1- Lot 4.....	178
Figure 5-13 Courbes de traction de la campagne 1 – Lot 5	179
Figure 5-14 Zoom sur la partie de mise en tension - Campagne 1- Lot 5.....	179
Figure 5-15 Courbes de traction de la campagne 1 – Lot 6	180
Figure 5-16 Zoom sur la zone de mise en tension- Campagne 1- Lot 6.....	180
Figure 5-17 Courbes de traction de la campagne 1 – Lot 7	180
Figure 5-18 Zoom sur la zone de mise en tension - Campagne 1- Lot 7.....	180
Figure 5-19 Courbes de traction de la campagne 1 – Lot 8	181
Figure 5-20 Zoom sur la zone de mise en tension- Campagne 1- Lot 8.....	181
Figure 5-21 Profil de la résine dans les talons et sur-longueurs de fibre [79].....	182
Figure 5-22 Longueurs de filament, prise au talon et sur-longueur [79].....	183
Figure 5-23 Campagne virtuelle avec tirages aléatoires des paramètres de sur-longueurs et de prise au talon et comparaison avec les essais sur mèche de référence.....	185
Figure 5-24 Influence de l'effet de la prise de la mèche dans le talon sur le modèle.....	186
Figure 5-25 Influence de l'effet de la sur-longueur sur le modèle.....	186
Figure 5-26 Modèle avec paramètre de sur-longueur = 0,2%.....	188
Figure 5-27 Zoom sur la zone de mise en tension.....	188
Figure 5-28 Modèle initial avec une hypothèse à 80% de la contrainte à rupture fournisseur et paramètre de forme à 20	188
Figure 5-29 Modèle modifié avec $\sigma_{\max_fibre} = 3477\text{MPa}$ et $\lambda_{\text{Weibull fibre}} = 3,2$	189
Figure 5-30 Campagne virtuelle de 20 essais virtuels.....	190
Figure 5-31 Campagne 1 - Lot 1 : Comparaison des essais avec le modèle pour différents nombres de filaments rompus.....	191
Figure 5-32 Campagne 1 - Lot 2 : Comparaison des essais avec le modèle pour différents nombres de fibres rompues.....	191
Figure 5-33 Campagne 1 - Lot 3 : Comparaison des essais avec le modèle pour différents nombres de fibres rompues.....	192
Figure 5-34 Campagne 1 - Lot 4 : Comparaison des essais avec le modèle pour différents nombres de fibres rompues.....	193
Figure 5-35 Campagne 1 - Lot 5 : Comparaison des essais avec le modèle	194

Figure 5-36 Campagne 1 - Lot 6 : Comparaison des essais avec le modèle	195
Figure 5-37 Campagne 1 - Lot 7 : Comparaison des essais avec le modèle	196
Figure 5-38 Campagne 1 - Lot 8 : Comparaison des essais avec le modèle	197
Figure 5-39 Modèle avec paramètre de forme =20, comparé aux essais du lot 8.....	198
Figure 5-40 Modèle avec paramètre de forme=20, comparé aux essais sur mèche de référence	198

Liste des tableaux

Table 1-1 Exemple de différents types d'ensimage, proposés par la société Hexcel [14].....	34
Table 1-2 Classification des fibres de carbone [4]	34
Table 1-3 Etudes comparatives des propriétés mécaniques de différents renforts [4].....	35
Table 1-4 Avantages et inconvénients de la fibre de carbone.....	36
Table 1-5 Propriétés corrélées de la fibre de carbone [20]	36
Table 1-6 Détermination de la longueur de l'éprouvette suivant la masse linéique nominale de la mèche [51]	58
Table 2-1 Barème utilisé pour la probabilité de non détection	74
Table 2-2 Barème utilisé pour la probabilité d'occurrence.....	74
Table 2-3 Barème utilisé pour la gravité.....	75
Table 2-4 Scenarii de vitesse des cadres et du peigne en fonction de H(mm) et Lp(mm)	84
Table 2-5 Comparatif des matériaux d'œillet utilisés en tissage	88
Table 2-6 Caractéristiques mécaniques des mèches de carbone A et B testées par Lee. et al. [25]	88
Table 2-7 Comparaison des propriétés de la mèche de carbone A et B à différents stades : Données fournisseur, à réception, au cours du tissage, et dans le tissu [25]	88
Table 2-8 Campagnes du plan d'expérience	93
Table 2-9 Exemple de résultats obtenus par l'analyse du plan d'expérience.....	94
Table 3-10 Normes définissant les modalités de mesure des propriétés de traction des fibres de carbone en fonction de l'organisme de normalisation	113
Table 3-11 Résultats de traction de mèches imprégnées AS7 12K.....	115
Table 3-12 Résultats des essais de traction sur mèche sèche avec talons en aluminium	121
Table 4-1 Données fournisseur sur la mèche testée	127
Table 4-2 Valeurs de référence pour une population de 20 éprouvettes testées suivant le protocole de traction retenu	127
Table 4-3 Dispersion comparée entre le lot de référence et le lot de mèches endommagées.....	130
Table 4-4 Facteurs et niveaux de la campagne 1 : « Guide fils ».....	133
Table 4-5 Configurations générées par le plan d'expérience fractionnaire pour la campagne 1 : « Guide-Fils ».....	133
Table 4-6 Résultats moyennés par lots et écarts-types des essais de traction de la campagne 1 : « Guide-fils »	133

Table 4-7 Résultats de l'analyse du plan d'expérience associé à la campagne 1 : « Guide-Fils »	134
Table 4-8 Résultats morphologiques – Campagne 1 : « Guide-Fils »	136
Table 4-9 Facteurs et niveaux de la campagne 2 : « Cinématique »	139
Table 4-10 Configurations générées par le plan d'expérience fractionnaire pour la campagne 2 : « Cinématique »	139
Table 4-11 Résultats moyennés et écart-types des essais de traction de la campagne 2 : « Cinématique »	139
Table 4-12 Résultats de l'analyse par régression de la campagne 2 : « Cinématique »	140
Table 4-13 Résultats morphologiques – Campagne 2 : « Cinématique »	141
Table 4-14 Facteurs et niveaux de la campagne 3 : « Matière ensimage »	144
Table 4-15 Configurations générées par le plan d'expérience fractionnaire pour la campagne 3 : « Matière – Ensimage »	144
Table 4-16 Résultats moyennés et écart-types des essais de traction de la campagne 3 : « Matière ensimage »	145
Table 4-17 Résultats de l'analyse par régression de la campagne 3 : « Matière ensimage »	145
Table 4-18 Résultats morphologiques – Campagne 3 : « Matière – Ensimage »	147
Table 4-19 Facteurs et niveaux de la campagne 4 : « Matière –titre »	150
Table 4-20 Configurations générées par le plan d'expérience fractionnaire pour la campagne 4 : « Matière –titre »	150
Table 4-21 Résultats moyennés et écart-types des essais de traction de la campagne 4 : « Matière –titre »	150
Table 4-22 Résultats de l'analyse par régression de la campagne « Matière –titre »	151
Table 4-23 Résultats morphologiques – Campagne 4 : « Matière – Titre »	152
Table 4-24 Facteurs et niveaux de la campagne 5 : « Cadres »	154
Table 4-25 Configurations générées par le plan d'expérience fractionnaire pour la campagne 5 : « Cadres »	154
Table 4-26 Résultats moyennés et écart-types des essais de traction de la campagne 5 : « Cadres »	155
Table 4-27 Résultats de l'analyse par régression de la campagne 5 : « Cadres »	155
Table 4-28 Résultats morphologiques – Campagne 5 : « Cadres »	157
Table 4-29 Facteurs et niveaux de la campagne 6 : « Peigne »	159
Table 4-30 Configurations générées par le plan d'expérience fractionnaire pour la campagne 6 : « Peigne »	159
Table 4-31 Résultats moyennés et écart-types des essais de traction de la campagne 6 : « Peigne »	160

Table 4-32 Résultats de l'analyse par régression de la campagne 6 : « Peigne »	160
Table 4-33 Résultats morphologiques – Campagne 6 : « Peigne »	162
Table 4-34 Paramètres appliqués par configuration - Campagne cumulée	164
Table 4-35 Propriétés en traction des éprouvettes des configurations optimisée et dégradée – Campagne cumulée	165
Table 5-1 Valeurs des coefficients de corrélation R^2 et R^2 ajusté par campagne * Données insuffisantes pour l'analyse de régression polynomiale.....	173
Table 5-2 Valeurs des coefficients de corrélation R^2 et R^2 ajusté pour la campagne « Guide-fil » pour différents indicateurs linéarisés	173
Table 5-3 Paramètres du modèle	189
Table 5-4 Paramètres du modèle adapté au lot 1.....	190
Table 5-5 Paramètres du modèle adapté au lot 2.....	191
Table 5-6 Paramètres du modèle adapté au lot 3.....	192
Table 5-7 Paramètres du modèle adapté au lot 4.....	193
Table 5-8 Paramètres du modèle adapté au lot 5.....	193
Table 5-9 Paramètres du modèle adapté au lot 6.....	194
Table 5-10 Paramètres du modèle adapté au lot 7	195
Table 5-11 Paramètres du modèle adapté au lot 8.....	196
Table 5-12 Ensemble des observations entre le modèle développé et les résultats expérimentaux	199

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	21
CHAPITRE I – REVUE DE LA LITTERATURE.....	25
INTRODUCTION : LA NOTION D’ECHELLE APPLIQUEE A LA PREFORME CARBONE	27
I) GENERALITES SUR LA FIBRE DE CARBONE	28
I. 1) Historique de la fibre de carbone.....	28
I. 2) Echelle microscopique « micro » : la fibre de carbone	28
I. 3) Echelle mésoscopique « méso » : la mèche de carbone	33
II) TECHNOLOGIES DE TRANSFORMATION TEXTILE	36
II. 1) Classification.....	36
II. 2) Structures bidimensionnelles	37
II. 3) Structures tridimensionnelles	43
III) CARACTERISATION DE L’ENDOMMAGEMENT	46
III. 1) Echelle microscopique.....	47
III. 2) Echelle mésoscopique	55
III. 3) Echelle macroscopique.....	60
CONCLUSIONS DU CHAPITRE I.....	64
CHAPITRE II – RISQUES D’ENDOMMAGEMENT AU COURS DES PROCEDES.....	65
I) ANALYSE DES MODES DE DEFAILLANCES, DE LEURS EFFETS ET DE LEUR CRITICITE ORIENTEE SANTE-MATIERE.....	67
I. 1) Présentation	67
I. 2) Description de la gamme opératoire du procédé de tissage	68
I. 3) Détermination de la fréquence, probabilité et criticité des modes de défaillance.....	74
I. 4) Analyse des résultats.....	75
II) ETUDE CINEMATIQUE.....	77
II. 1) Détermination de l’espace expérimental.....	78
II. 2) Cadres et peigne.....	81
II. 3) Cinématique du fil de chaîne.....	85
II. 4) Œillets.....	86
II. 5) Matière.....	88
III) PLAN D’EXPERIENCE.....	89
III. 1) Présentation	90
III. 2) Choix du plan d’expérience	90
III. 3) Facteurs et niveaux	91
III. 4) Résolution du plan d’expérience.....	94
CONCLUSIONS DU CHAPITRE II.....	98

CHAPITRE III – METHODES DE CARACTERISATION.....	99
I) MODELISATION EXPERIMENTALE DE L'ENDOMMAGEMENT	101
I. 1) Objectif	101
I. 2) Approche retenue	101
I. 3) Protocole	103
II) CRITERES DE CARACTERISATION DE L'ENDOMMAGEMENT	105
II. 1) Paramètres descriptifs d'une mèche.....	105
II. 2) Mesure mécanique de la dégradation d'une mèche	106
II. 3) Mesure morphologique de la dégradation d'une mèche.....	107
III) CARACTERISATION PAR TRAITEMENT ET ANALYSE D'IMAGES.....	109
III. 1) Acquisition d'images	112
III. 2) Traitement de l'image	112
III. 3) Détection des pixels carbone	112
III. 4) Détection du corps de la mèche.....	112
III. 5) Mesure de la largeur du corps de mèche.....	112
III. 6) Mesure de l'orientation des filaments à la surface du corps de la mèche.....	112
III. 7) Conclusion sur la quantification des indicateurs morphologiques	113
IV) PROTOCOLE DE CARACTERISATION MECANIQUE	113
IV. 1) Normes existantes	113
IV. 2) Protocole de traction sur mèche imprégnée	114
IV. 3) Protocole de traction sur mèche sèche	116
CONCLUSION DU CHAPITRE III	123
CHAPITRE IV – CARACTERISATION MECANIQUE ET MORPHOLOGIQUE PAR CAMPAGNE.....	125
I) CHOIX D'UN VOLUME DE MESURE	127
I. 1) Caractérisation mécanique	127
I. 2) Caractérisation morphologique	130
I. 3) Conclusion	131
II) RESULTATS PAR CAMPAGNE	132
II. 1) Campagne 1 : Guide-fils	132
II. 2) Campagne 2 : Cinématique	138
II. 3) Campagne 3 : Matière – Ensimage.....	144
II. 4) Campagne 4 : Matière – Titre.....	149
II. 5) Campagne 5 : Cadres.....	153
II. 6) Campagne 6 : Peigne	158
III) CAMPAGNE CUMULEE	164
CONCLUSION DU CHAPITRE IV	167
CHAPITRE V – RECHERCHE D'UN MODELE D'AJUSTEMENT	169
I) IDENTIFICATION DU LIEN MORPHOLOGIQUE / MECANIQUE	171
I. 1) Objectif	171
I. 2) Recherche des relations d'ajustements	171
I. 3) Tentatives de linéarisation classique.....	172
II) ETUDE DETAILLEE DE LA CAMPAGNE 1 – « GUIDE-FILS »	174
II. 1) Corrections liées au montage.....	174

II. 2) Etude comparée des courbes de références et des courbes de la campagne 1	175
III) ESSAIS VIRTUELS SUR MECHE	181
III. 1) Les modèles de la littérature	181
III. 2) Modèle proposé	182
III. 3) Essais virtuels et campagne virtuelle	184
III. 4) Bilan de l'application du modèle	197
CONCLUSION DU CHAPITRE V	200
CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	201
REFERENCES.....	205
LISTE DES ANNEXES	213
ANNEXE 1 : AMDEC ORIENTEE SANTE-MATIERE	1
ANNEXE 2: DATA SHEET COLLE STRUCTURALE SCOTCH-WELD™ 9828 B/A	7
ANNEXE 3: DATA SHEET HEXTOW® AS7.....	11
ANNEXE 4 : DATA SHEET HEXTOW® IM7.....	13

Introduction générale

Ces dernières années, les matériaux composites se sont imposés comme la réponse évidente aux contraintes environnementales de plus en plus pressantes. Dans cette course effrénée vers l'utilisation de matériaux toujours plus légers et performants, la fibre de carbone est sans conteste un élément central. En effet, elle offre une résistance et un module élevés pour une densité et un coût relativement faibles, comparés aux matériaux métalliques. Ainsi, les fibres de carbone, utilisées comme renfort pour les matériaux composites restent fortement employées.

Afin de tirer le meilleur parti des propriétés de la fibre, celle-ci est organisée sous forme d'architecture fibreuse tissée, non-tissée, tressée, ou encore tricotée. Le choix de la structure textile ayant un impact direct sur l'orientation des fibres par rapport aux sollicitations mécaniques des pièces dans lesquelles elles seront utilisées, ainsi que sur la fraction volumique de fibres au sein de la préforme, celle-ci est choisie en fonction des contraintes du produit final, soit en l'occurrence ici, du matériau composite.

Si les technologies de transformation textile permettant de passer de la fibre de carbone à la préforme sèche sont bien connues aujourd'hui, nous mesurons encore mal les dégradations que subit la matière au contact répété des bobinoirs, guide-fils, et autres éléments des machines de transformation textile.

Ce travail de thèse concerne les étapes de fabrication de la préforme fibreuse, et s'intéresse au cas particulier des préformes tissées en fibres longues de carbone.

Les étapes de fabrication de la préforme sont fortement traumatisantes pour les mèches. En effet, le frottement permanent avec les différents organes des machines de transformation textile favorise la rupture des mono-filaments constituant la mèche, modifiant ainsi les propriétés induites de la mèche, et donc du matériau composite qui en est constitué.

Le principal objectif de cette thèse est de définir les paramètres du procédé de fabrication des préformes responsables de l'endommagement des mèches de carbone afin de pouvoir l'anticiper voire le réduire.

En effet, dans le contexte de réduction de la masse des pièces structurales aéronautiques, maîtriser la dégradation des constituants de base du matériau composite permet de mieux dimensionner les besoins en matière pour répondre aux contraintes mécaniques et atteindre les spécifications matériaux exigées. D'autre part, nous pensons que l'état de la mèche pourrait conditionner certains paramètres clés du procédé de consolidation du matériau composite tel que l'étape d'infiltration de la préforme fibreuse. Dans le même ordre d'idée, cette maîtrise, ou du moins cette connaissance de l'état d'endommagement de la mèche pourrait permettre d'affiner les données d'entrée mécanique et morphologique pour la prédiction du comportement mécanique des préformes. Enfin, réduire l'endommagement des mèches de carbone permettrait de réduire l'encrassement des dispositifs lié aux poussières de carbone, qui conduit à la

détérioration des machines de transformation textile, très coûteuses et perfectionnées, et de préciser les exigences concernant la santé des utilisateurs.

La démarche adoptée durant les travaux de thèse s'appuie :

- sur une identification des sources de dégradation de la mèche de carbone au sein des procédés de transformation textile,
- sur une quantification de la dégradation qu'elles occasionnent sur les mèches lors des différentes étapes de transformation textile,
- sur une orientation des concepteurs et des opérateurs vers de meilleures pratiques.

Pour ce faire, un banc de test a été conçu et réalisé afin de simuler les différentes étapes, seules ou combinées, de transformation de la mèche de carbone, depuis la mèche sortie de bobine fournisseur jusqu'à l'architecture textile. Un protocole d'acquisition d'images ainsi que des algorithmes de traitement et d'analyse d'images ont été développés. Des indicateurs morphologiques de l'endommagement de la mèche ont ainsi pu être quantifiés. Parallèlement, un protocole d'essai de traction sur mèche sèche a été mis au point afin de caractériser mécaniquement les propriétés induites de la mèche endommagée.

Rappelons que l'endommagement est un phénomène multi-échelles : il peut se produire à l'échelle microscopique, celle de la fibre, par rupture des liaisons chimiques dans l'interphase à la périphérie des fibres ; à l'échelle mésoscopique, celle de la mèche, par rupture de monofilaments ; ou encore à l'échelle macroscopique, celle de la mèche imprégnée ou de la préforme fibreuse injectée, par délaminage, décohésion fibre/matrice, fissuration matricielle. Ce travail s'inscrit à l'échelle mésoscopique, ce qui correspond ici, à l'échelle de la mèche considérée comme un ensemble de filaments.

Dans le premier chapitre, une étude bibliographique est proposée, afin de mieux appréhender la morphologie et le comportement d'une mèche, selon différentes échelles. Dans un premier temps, le procédé de fabrication de la fibre de carbone est détaillé afin de comprendre l'influence des paramètres de fabrication sur la composition, la morphologie et les propriétés induites de la fibre de carbone. Dans un second temps, les propriétés générales de la mèche constituées de ces fibres de carbone sont détaillées, ainsi que des généralités et définitions utilisées dans la suite du mémoire. Les structures textiles constituées de ces mèches sont ensuite présentées selon la technologie utilisée et la dimensionnalité des produits résultants. Pour chacune de ces technologies, l'endommagement engendré par le procédé de transformation sur la mèche de carbone est quantifié, d'après les données de la littérature. Enfin, les différentes techniques de prédiction et de mesure de l'endommagement sont présentées, selon leur échelle caractéristique de mesure.

Dans le deuxième chapitre, une analyse des modes de défaillance, de leur effet et de leur criticité, orientée santé-matière est menée afin de déterminer les paramètres critiques pour l'endommagement de la mèche. Les différentes étapes du procédé de tissage sont ainsi passées en revue et les différents risques d'influence sur la santé-matière de la mèche sont listés. Une fois les paramètres potentiellement influents identifiés, un état de l'art est réalisé, afin de déterminer les valeurs usuelles pour ces différents paramètres. Un plan d'expérience permet ensuite

d'organiser le plan d'essai, afin d'optimiser l'analyse tout en réduisant le nombre de combinaisons à tester.

Dans le troisième chapitre, le banc de test mis au point durant la thèse est présenté. Il permet de modéliser expérimentalement les paramètres influents identifiés dans l'analyse des modes de défaillance, de leur effet et de leur criticité. Les critères morphologiques et mécaniques de l'endommagement sont ensuite introduits. Le protocole de traitement et d'analyse d'images, ainsi que le protocole de réalisation des essais de traction sur mèche sèche, permettant de mesurer ces critères, sont détaillés.

Dans le quatrième chapitre, les résultats de chaque méthode de caractérisation sont donnés. Pour chaque campagne d'essai, les influences, seules ou combinées, de chaque paramètre précédemment identifié comme influent sont analysées. Une cartographie des paramètres optimaux et minimaux est ainsi proposée. Enfin, une campagne des paramètres optimaux et minimaux cumulés permet de mettre en évidence l'influence de l'historique de la dégradation sur la mèche de carbone.

Enfin dans le cinquième chapitre, une étude de corrélation entre les indicateurs mécaniques et morphologiques est menée. Afin d'expliquer le comportement des mèches endommagées en traction, une première approche de modélisation du comportement en traction des mèches est proposé. Ce dernier tend à faire le lien entre les indicateurs mécaniques et morphologiques.

Chapitre I – Revue de la littérature

Les matériaux composites CMO sont « constitués par une matrice organique renfermant des fibres, souvent réparties de façon optimale pour assurer la plus grande résistance dans la direction des plus grandes contraintes » [1].

Afin d'assurer cette répartition optimale, les fibres utilisées sont organisées sous forme de tissus, tresses, unidirectionnels, etc. Ces architectures fibreuses permettent d'obtenir des renforts orientés dans une, deux, jusqu'à une multitude de directions.

Comme présenté en introduction, les procédés de transformation textile endommagent les mèches de carbone. En effet, les filaments continus qui constituent la mèche de carbone sont sensibles aux frottements qu'ils subissent au contact des métiers. De plus, l'endommagement engendré est un phénomène complexe et multi-échelles.

Dans un premier paragraphe sont posées les bases de l'étude : la fibre de carbone, sa composition, sa morphologie et ses propriétés. Le deuxième paragraphe est consacré aux différents procédés de transformation textile, qui permettent la fabrication de la préforme fibreuse. Le troisième paragraphe présente l'endommagement avec les critères de caractérisation et les différentes méthodes utilisées dans la bibliographie pour les mesurer.

PLAN DU CHAPITRE

INTRODUCTION : LA NOTION D'ÉCHELLE APPLIQUÉE A LA PREFORME CARBONE	27
I) GENERALITES SUR LA FIBRE DE CARBONE	28
I. 1) Historique de la fibre de carbone.....	28
I. 2) Echelle microscopique « micro » : la fibre de carbone	28
I. 3) Echelle mésoscopique « méso » : la mèche de carbone	33
II) TECHNOLOGIES DE TRANSFORMATION TEXTILE	36
II. 1) Classification.....	36
II. 2) Structures bidimensionnelles.....	37
II. 3) Structures tridimensionnelles	43
III) CARACTERISATION DE L'ENDOMMAGEMENT	46
III. 1) Echelle microscopique.....	47
III. 2) Echelle mésoscopique	55
III. 3) Echelle macroscopique.....	60
CONCLUSIONS DU CHAPITRE I.....	64

Introduction : la notion d'échelle appliquée à la préforme carbone

Les phénomènes d'endommagement de la mèche de carbone sont complexes puisque multi-échelles. Ici, ces phénomènes se complexifient encore davantage puisqu'ils sont étudiés dans le cas des matériaux composites, qui sont des matériaux hétérogènes constitués d'au moins deux constituants non miscibles, disposés selon une organisation géométrique particulière.

Dans la suite de ce chapitre, le matériau carbone sera étudié selon ses différentes échelles caractéristiques, présentées en figure 1-1.

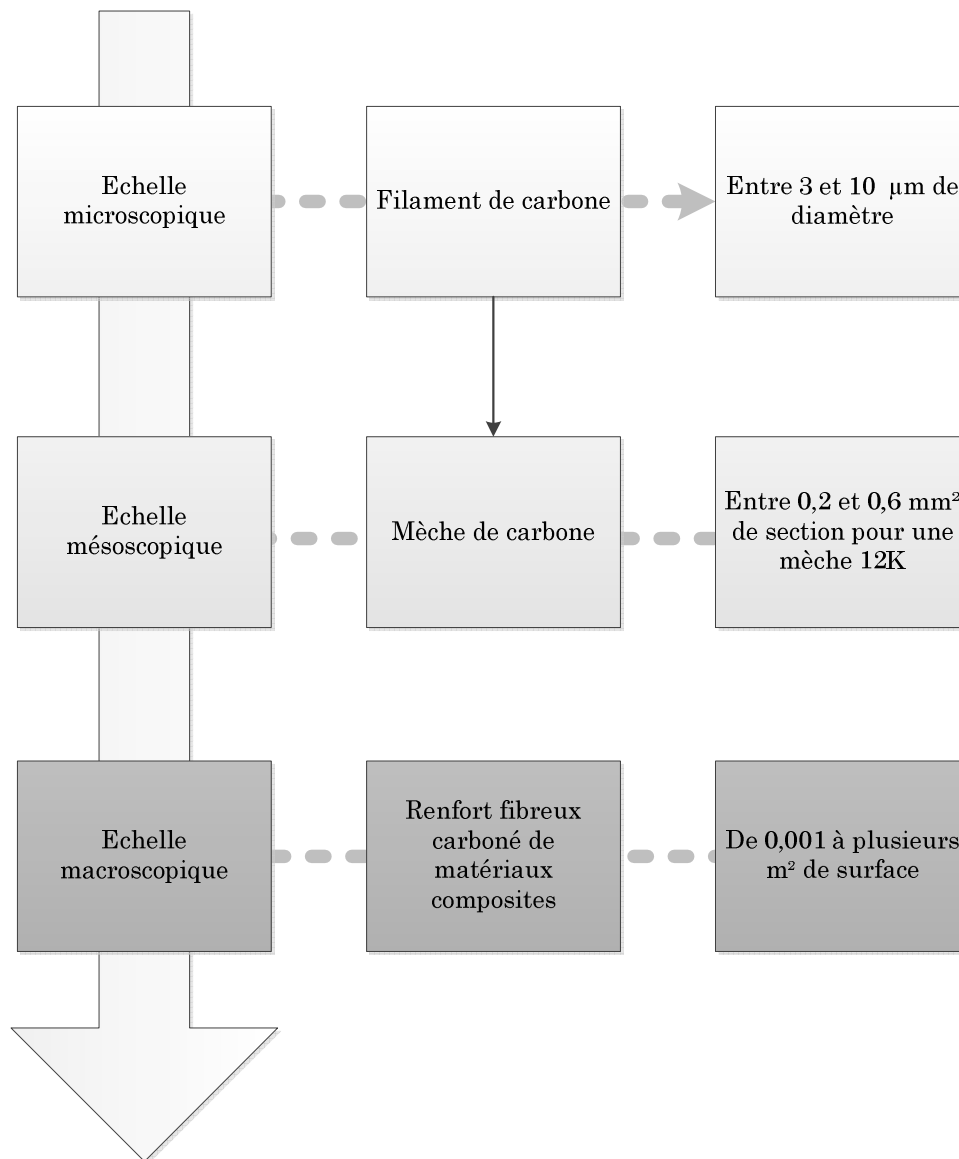


Figure 1-1 Echelles caractéristiques du renfort à base de fibres de carbone

I) Généralités sur la fibre de carbone

I. 1) Historique de la fibre de carbone

La première fibre de carbone est obtenue en 1880 par Edison. En effet pour réaliser la toute première lampe à incandescence, il utilise la carbonisation d'une fibre de bambou dans un récipient sous « vide d'air » pour obtenir une incandescence [2].

Tout au long de la fin du 19^{ème} siècle, les scientifiques vont améliorer la durée de vie de la lampe à filament de carbone, jusqu'à ce qu'en 1903, le filament de carbone soit remplacé par un filament de tungstène.

Après la 2^{nde} guerre mondiale, la société Union Carbide commence à étudier la possibilité de remplacer les filaments de tungstène par des filaments d'un polymère cellulosique : la rayonne. Finalement, l'idée va rapidement être abandonnée, mais les études sur la carbonisation de la rayonne vont continuer. C'est ainsi qu'en 1955, vont apparaître des fibres de carbone, réalisées à partir de tresses ou de tissus de rayonne, chauffés sur des cadres rigides.

Dans les années 60, des études vont permettre d'améliorer les propriétés mécaniques de la fibre de carbone. Ainsi, Shindo, de l'Institut de recherche industrielle d'Osaka [3] dépose un brevet en 1961 sur un procédé permettant d'obtenir une fibre de carbone à partir de polyacrylonitrile, dont la résistance et le module en traction sont largement améliorés (respectivement 1500MPa et 150GPa). Dans le même temps, les recherches continuent pour améliorer l'orientation et la tension des fibres pendant la phase clé de carbonisation (« secret » de l'obtention de fibres haut module).

En 1967, trois compagnies anglaises (Morgan Crucible, Rolls Royce et Courtaulds) acquièrent la licence d'utilisation et commencent une production semi-industrielle. En 1971, Toray commence une production et une commercialisation de la fibre de carbone, suivi d'Hercules (USA), Le carbone/Lorraine en 1972, et de Toho Beslon/Rayon (Japon) en 1973.

I. 2) Echelle microscopique « micro » : la fibre de carbone

I. 2. a) Procédé de fabrication (pour les fibres ex-PAN)

La fibre de carbone peut être obtenue à partir de plusieurs précurseurs :

- la rayonne (cellulose régénérée)
- le brai (résidu de houille et de pétrole)
- le polyacrylonitrile (PAN)

Dans le paragraphe suivant, nous détaillons uniquement le procédé de fabrication des fibres de carbone ex-PAN. En effet, la majeure partie de la production de la fibre de carbone est issue de ce précurseur, en particulier pour les applications dans le domaine des renforts pour les composites à matrice organique (CMO).

I. 2. a. (i) Filage

La fibre de carbone ex-PAN est obtenue par polymérisation puis filage des fibres acryliques par voie solvant et coagulation en milieu solvant ou non solvant. Cette réaction de polymérisation est présentée en figure 1-2.

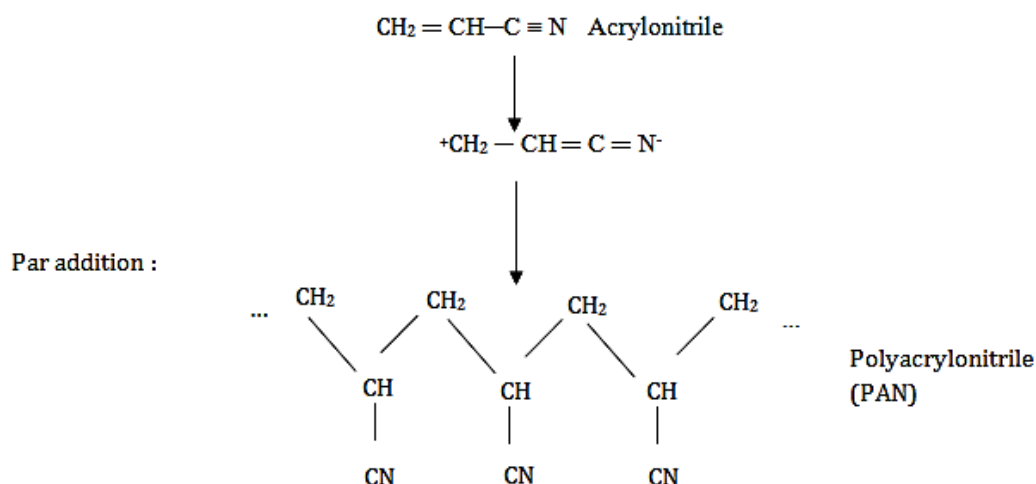


Figure 1-2 Réaction de polymérisation de l'acrylonitrile

Ce procédé est assez classique puisqu'il s'agit du procédé traditionnellement utilisé pour le filage des fibres textiles synthétiques (nylon, acrylique, polyester, ...).

Néanmoins, même si le procédé reste classique, des différences sensibles sont observées selon les fabricants, au niveau de différents composants :

- Conomère (acrylate ou méthacrylate de méthyle)
- Taux de conomère
- Agent de protection (finish)
- Solvant
- Solution coagulante

Au cours du filage, les fibres peuvent être étirées jusqu'à 500% d'allongement [4].

Enfin, suivant les sels présents dans le polyacrylonitrile, précurseur de la fibre de carbone, des impuretés métalliques peuvent se retrouver dans la fibre de carbone.

I. 2. a. (ii) Traitements thermiques

A la fin de l'étape de filage, des bobines de PAN sont obtenues. C'est une succession de traitements thermiques, schématisés sur la figure 1-3, appliqués sous contrainte mécanique sur la fibre de PAN, qui vont conduire à la fabrication des fibres de carbone ex-PAN.

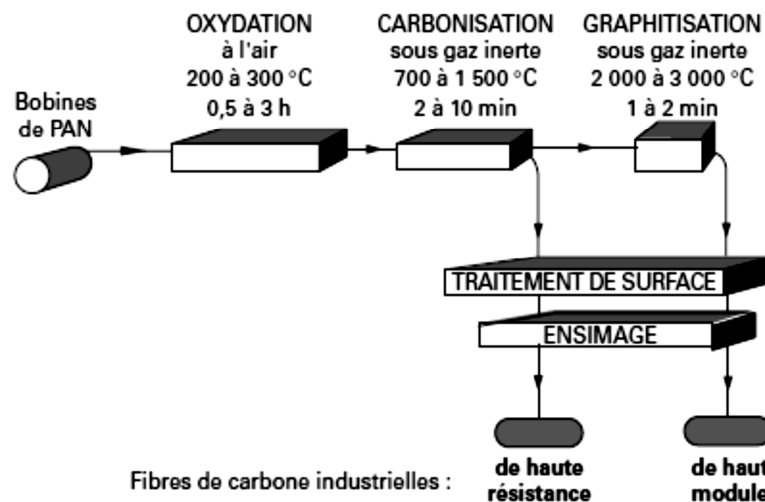


Figure 1-3 Procédé de fabrication des fibres ex-PAN [4]

▪ Oxydation ménagée

L'oxydation ménagée est réalisée sous air, entre 200 et 300°C et sous tension, sur une durée allant de 30 min à 3h, afin d'aligner les chaînes et former des groupements fonctionnels oxygénés indispensables pour réticuler les chaînes, cycliser et déshydrogéner le carbone.

Le précurseur de la fibre (en l'occurrence ici le PAN) subit alors des modifications physiques et chimiques. Il passe en effet d'un état plastique, et d'une couleur blanche, à un état infusible thermiquement stable et à la couleur noire, si caractéristique des fibres de carbone.

▪ Carbonisation

Le précurseur stabilisé est ensuite carbonisé sous azote, à des températures allant de 1200°C à 1500°C pendant 2 à 10 min.

La fibre carbonisée contient alors (suivant les fournisseurs, et les références) :

- de 90 à 97% de carbone
- moins de 10% d'azote
- environ 1% d'oxygène
- moins de 1% d'hydrogène

Lors de la carbonisation, un réarrangement des plans polyaromatiques a lieu, ce qui induit une modification des propriétés mécaniques et chimiques de la fibre.

A l'issue de la carbonisation, la fibre de carbone obtenue est une fibre haute résistance (HR), dont le module est compris entre 200 et 260 GPa. La valeur maximale de tenue en traction est alors atteinte. Si la température de traitement augmente, en particulier lors de la graphitisation, cette propriété diminue au profit du module, qui lui augmente.

▪ Graphitisation

La graphitisation consiste à placer la fibre carbonisée à des températures comprises entre 2000 et 3000°C, sous gaz inerte, pendant 1 à 2 minutes, sous tension contrôlée.

Cette opération permet d'éliminer les atomes d'azote et d'oxygène de la structure.

Il est également observé que les unités structurales de base¹ (USB) du monofilament contiennent un nombre de couches polyaromatiques plus élevé. Les joints de grain, ou espaces inter- USB sont donc plus nombreux, ce qui confère à la structure une plus grande densité, une plus grande compacité ainsi qu'une meilleure organisation cristalline.

Une fibre est alors obtenue contenant plus de 99% de carbone, dite HM (i.e. dont le module est compris entre 370 et 600 GPa).

I. 2. a. (iii) Traitements de surface

La fibre de carbone est naturellement assez peu réactive chimiquement. Dans le cadre d'une utilisation pour les matériaux composites CMO, l'objectif des traitements de surface est de créer artificiellement une bonne adhérence et adhésion de la fibre de carbone avec la matrice polymérique par ancrage mécanique et interactions chimique et physique.

▪ Procédé mécanique

Le procédé mécanique [5], que ce soit par grenailage, sablage ou impact LASER, consiste à attaquer la surface de la fibre, générant ainsi des rugosités, qui seront ensuite des points d'ancrage pour la résine.

▪ Procédé chimique

Les trois méthodes de traitements classiques sont : l'oxydation humide, l'oxydation sèche, et l'oxydation anodique [4].

Ces trois traitements ont pour but de créer des fonctions chimiques polaires à la surface de la fibre, en plus d'une légère rugosité, afin de permettre une meilleure adhésion.

▪ Autres procédés

Xu *et al.* [6] ont également montré que l'irradiation des fibres de carbone par des terres rares, en l'occurrence une solution de nitrate praseodymium, créait des granules à la surface de la fibre, augmentant l'affinité entre les fibres et la matrice (époxy).

Globalement, les traitements de surface doivent être utilisés de manière contrôlée. En effet, ils ont pour conséquence de fragiliser la fibre. Nous observons que plus les traitements de surface sont durs, plus la résistance en compression du CMO augmente, étant donné qu'il y a une meilleure adhérence entre le renfort et la matrice, et plus la résistance en traction diminue, le renfort étant dégradé [4].

¹ Les unités structurales de bases sont composées d'un empilement de petites molécules polyaromatiques (PAH : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques). La condensation et l'agencement spatial de ces USB sont à l'origine de la formation des carbones polyaromatiques. [90]

I. 2. b) Morphologie de la fibre de carbone

Les premières études menées par Diefendorf et Tokarsky [7], ainsi que par Johnson [8] ont montré que la nature des fibres de carbone ex-PAN était fibrillaire par nature, imitant la structure fondamentale du polymère précurseur de la fibre [9]. Ils ont aussi découvert que le module d'une fibre de carbone ex-PAN varie à travers sa section. Huang et Young [10] ont confirmé cette structure par spectroscopie Raman.

Johnson [8] et Endo [11] ont quant à eux employé la diffraction à rayons X pour montrer que les plans graphéniques des fibres de carbone ex-PAN n'avaient pas d'ordre tridimensionnel régulier [9]. Johnson a aussi montré que des pores existaient entre les zones cristallines, et que dans les régions périphériques, les empilements de plans graphéniques étaient essentiellement parallèles à la surface. Cependant, dans la région centrale, Johnson a montré que ces zones graphitiques étaient pliées, comme « froissées ».

Le schéma de la microstructure proposée par Johnson est donné à la figure 1-4.

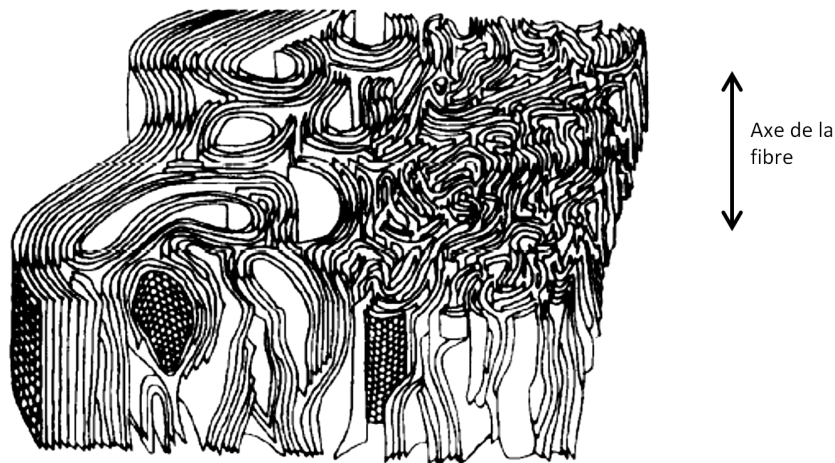


Figure 1-4 Microstructure de la fibre de carbone ex-PAN proposée par Johnson [4]

C'est principalement l'étape de carbonisation qui détermine l'arrangement des plans polyaromatiques. Après la carbonisation, la fibre est constituée de zones cristallines, désordonnées, et d'un empilement de couches carbonées polyaromatiques, d'un diamètre d'environ 1nm. Ces USB sont raccordées entre elles par des jonctions contenant des hétéroatomes [4]. La figure 1-5 présente la proposition de Guigon pour schématiser cette microtexture.

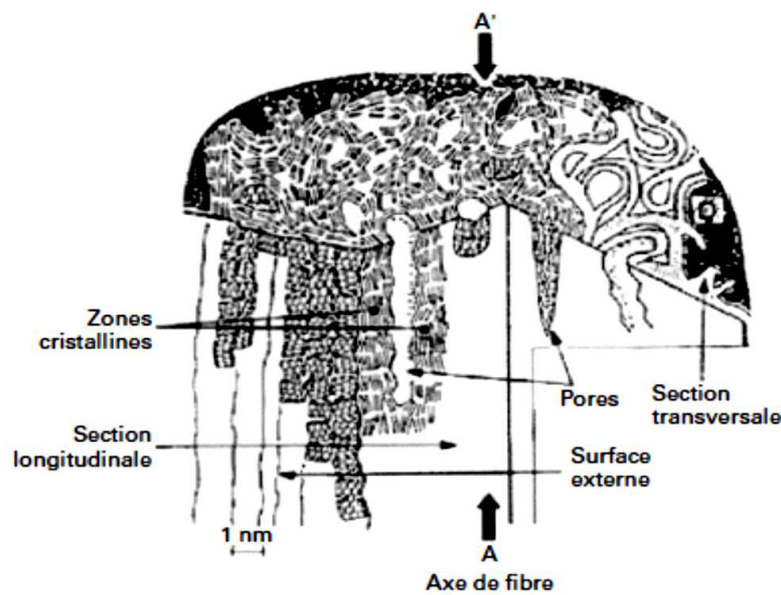


Figure 1-5 Microtexture d'une fibre de carbone haute résistance proposée par Guigon [12]

La fibre de carbone est donc fortement anisotrope. En effet, dans l'axe de la fibre, soit dans le plan des couches graphéniques, les liaisons, covalentes, sont très fortes, alors que dans la direction radiale, les liaisons de Van Der Waals entre couches graphéniques (empilements), sont beaucoup plus faibles.

I. 3) Echelle mésoscopique « méso » : la mèche de carbone

Une mèche est un assemblage de quelques milliers de filaments, éventuellement maintenus ensemble par friction ou torsion.

Les mèches de carbone sont disponibles avec plusieurs titres : en standard, 3K, 6K, 12K, et de 24K à 96K pour les « grosses mèches ». Ce titre correspond à un nombre de filaments en section. Le titre de 3K par exemple correspond à 3000 filaments unitaires en section.

Dans le cadre de son utilisation pour les préformes des matériaux composites CMO, la fibre de carbone est principalement utilisée sous forme de filaments continus. Néanmoins, nous les retrouvons également sous la forme de filés de fibres.

I. 3. a) Traitement de surface de la mèche : l'ensimage

L'ensimage a pour fonction de lier les monofilaments d'une mèche entre eux et d'améliorer la résistance au frottement pour faciliter les opérations de bobinage, tissage, etc.

Les ensimages utilisés sont généralement constitués de lubrifiants, mais aussi de pré-polymères, de type époxy ou polyester, les rendant compatibles des applications CMO [13].

Leur concentration varie de 0 à 1,6% suivant l'utilisation ultérieure de la mèche de carbone comme le montrent les préconisations des fournisseurs en table 1-1.

Désignation	Durée de vie	Compatibilité	Usage recommandé	Taux d'ensimage (%)
Non-ensimée	Illimitée	Epoxy, Phénolique, Polycarbonate, Polyuréthane, Polyester, Polysulfones, Ester de cyanate, Ester vinylique, Nylon, BMI, PS, PEEK, PEKK, PES, PVS, Polyamide, Polypropylène	Nappe pré-imprégnée	0
G	12 mois	Epoxy, Phénolique, Polyuréthane	Tissage Nappe pré-imprégnée	0,8 - 1,2 0,2 - 0,4
GP	Illimitée	Epoxy, Phénolique, Ester vinylique, Polyuréthane, Ester de cyanate, BMI	Tissage et placement filamentaire Nappe pré-imprégnée	0,8 - 1,2 0,2 - 0,4
H	Illimitée	Epoxy	Tissage	0,8 - 1,2
R	Illimitée	Epoxy, Polyester	Placement filamentaire	1,2 - 1,6
GS	36 mois	Epoxy, Ester vinylique, Polyuréthane	Nappe pré-imprégnée	0,3 - 0,7
E	Illimitée	Epoxy, Polyester	Nappe pré-imprégnée, Tissage, Pultrusion, Placement filamentaire	0,9 - 1,3
J	Illimitée	Epoxy	Tissage	0,8 - 1,2

Table 1-1 Exemple de différents types d'ensimage, proposés par la société Hexcel [14]

I. 3. b) Propriétés mécaniques

Les données qui servent de référence pour classer les différentes mèches de carbone entre elles sont les propriétés en traction « sur mèche imprégnée ». Elles sont obtenues par application de la norme NF EN ISO 10618. [15]

Les fibres sont classées d'après leur module d'élasticité en traction. Les différents types de fibres en fonction de leur module en traction sont donnés dans la table 1-2.

Type de fibre	Module en traction (GPa)
Usage général (UG)	$E < 200$
Haute résistance (HR)	$200 < E < 250$
Module intermédiaire (IM)	$250 < E < 350$
Haut module (HM)	$350 < E < 550$
Très haut module (THM)	$E > 550$

Table 1-2 Classification des fibres de carbone [4]

La fibre de carbone est appréciée pour ses très bonnes propriétés spécifiques. En effet, comparées aux fibres de verre, les fibres de carbone offrent un module et une résistance élevés

pour une masse volumique faible (environ 1,8 g/cm³ contre 2,6 g/cm³ pour les fibres de verre), comme le montre la table 1-3.

Fibre	Masse volumique (g/cm3)	Traction 0°		Compression 0°	Résistance au cisaillement interlaminaire (Mpa)
		Résistance (Mpa)	Module (Gpa)	Résistance (Mpa)	
Carbone [16]					
T300	1,76	3 530	230	1 470*	98*
T700S	1,80	4 900	230	1 470*	98*
T800H	1,81	5 490	294	1 570*	98*
M40	1,81	2 740	392	1 030*	80*
Verre [17]					
E	2,6	2 500*	73*	910*	70*
R	2,53	3 300*	86*	970*	70*
Aramide					
KEV 49	1,38	1 380*	72*	276*	60*
Résine époxydes [18]					
	1,2 pour un système non chargé	70 à 80 ²	10,2 ³	140-150 ⁴	
	1,6 -1,7 pour un système chargé de 60-65% de silice				

Table 1-3 Etudes comparatives des propriétés mécaniques de différents renforts [4]

* propriétés pour un composite normalisé à 60% de volume, résines époxydes, classe 180°C (norme CEI 60216-1)

Les fibres de carbone ont en outre une excellente tenue en compression, comparées aux fibres à base de verre ou d'aramide (voir table 1-3).

Enfin, les propriétés de résistance à la fatigue de la fibre de carbone sont largement supérieures à celle des autres fibres. En effet, nous constatons qu'un composite à base de fibres de carbone perd 20 à 30 % de ses propriétés mécaniques après 10 millions de cycles tandis qu'un composite à base de fibres de verre en perd 50% et un alliage d'aluminium 70% [4].

I. 3. c) Conclusions

Nous pouvons conclure en citant quelques avantages et quelques inconvénients reconnus de la fibre de carbone, et résumés dans la table 1-4.

² Norme ISO 527

³ Norme DIN 53457

⁴ Norme ISO 604

Avantages	Inconvénients
- Faible densité	- Anisotrope
- Module en traction élevé	- Résistance en compression faible comparée à la résistance en traction
- Stabilité thermique en l'absence d'oxygène jusqu'à 3000°C	- Tendance à s'oxyder (en monoxyde de carbone) au-delà de 400°C dans un milieu oxydant
- Stabilité chimique, en particulier vis-à-vis des acides forts	
- Conductivité thermique élevée	
- Résistivité électrique faible	

Table 1-4 Avantages et inconvénients de la fibre de carbone

Chung [19] résume en expliquant que toutes ces propriétés étant déterminées par la structure de la fibre de carbone, les différentes propriétés sont intrinsèquement liées entre elles. Ainsi, les différentes tendances citées dans la table 1-5 vont généralement de pair.

- ✧ Augmentation du module de traction
- ✧ Diminution de la contrainte à la rupture
- ✧ Diminution de la résistance à la compression
- ✧ Augmentation du module de cisaillement
- ✧ Augmentation du degré d'anisotropie
- ✧ Diminution de la résistivité électrique
- ✧ Augmentation de la conductivité thermique
- ✧ Augmentation de la densité
- ✧ Augmentation de la stabilité thermique (résistance à l'oxydation)
- ✧ Augmentation de la stabilité chimique
- ✧ Augmentation du coût

Table 1-5 Propriétés corrélées de la fibre de carbone [20]

II) Technologies de transformation textile

Les technologies de transformation textile permettent de passer de la mèche, soit l'échelle méso, à l'échelle de la préforme, correspondant à l'échelle macro.

II. 1) Classification

Il existe de nombreuses manières de classer les structures textiles entre elles :

- selon leur dimensionnalité : 1D, 2D, 3D, ...
- selon leur nombre d'axes : non-axial, mono-axial, ...
- selon leur technologie de fabrication : tissage, tricotage, tressage, non-tissés.

La figure 1-6 présente une classification proposée par Nemoz. D'autres classifications existent, comme celle de Fukuta et Aoki [21] par exemple.

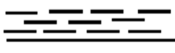


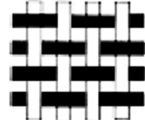


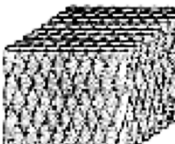
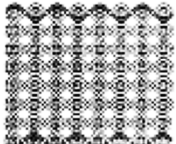

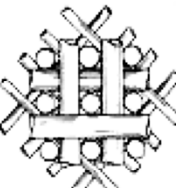

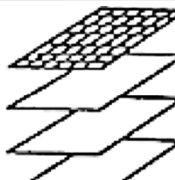



AXE - AXIS DIMENSION		0 NON-AXIAL	1 MONO-AXIAL	2 BI-AXIAL	3 TRI-AXIAL	n MULTI-AXIAL
1D			 Fil - Roving			
	2D	 Mat à fibres coupées Cutted fibers mat	 Nappe UD UD web	 Armure toile tissée Twill weave	 Tissage triaxial Tri-axial weaving	 Tricots multiaxiaux Multi-axial knits and weaves
3D	ÉLÉMENT LINEAIRE LINEAR ELEMENT		 Tresse 3-D Tridimensional braid	 Tissage multicouche Multilayer weaving	 Tissage triaxial 3-D 3-D triaxial weaving	 Tissage multiaxial n-D n-D multi-axial weaving
	ÉLÉMENT PLAN PLANAR ELEMENT	 Non-tissé 3-D 3-D nonwoven	 Laminé cousu Stitched laminate	 Poutre en H ou I H- or I- shaped beam	 Nid-d'abeilles Honeycomb	 Tricot double paroi Double wall fabric

Figure 1-6 Principaux types d'architectures textiles de renfort [22]

Le choix de la définition textile de la préforme ayant un impact direct sur l'orientation des fibres et sur la fraction volumique de la préforme, celle-ci est choisie en fonction des attentes et des contraintes du produit final, soit en l'occurrence ici, du matériau composite.

II. 2) Structures bidimensionnelles

II. 2. a) Mat à fibres coupées

Le mat à fibres coupées est un non-tissé. Il s'agit d'une nappe constituée de fibres discontinues non-orientées, dont la cohésion est assurée, soit par des méthodes mécaniques, physiques ou chimiques, soit par une combinaison de ces méthodes.

Le caractère aléatoire de la disposition des fibres en fait un matériau isotrope dans le plan du mat, non-axial, à la condition que l'épaisseur du mat soit telle qu'il n'y ait pas de fibres hors-plan.

Dans le cas de ce procédé, nous ne pouvons pas parler d'endommagement par rupture de fibres, puisque par définition, les fibres sont utilisées coupées.

II. 2. b) Nappe UD

La nappe UD (pour **un**idirectionnelle) peut être vue comme un cas particulier de non-tissé. Il s'agit d'un mat à fibres longues, toutes orientées selon la même direction, et consolidées généralement par couture ou aiguilletage. C'est donc un matériau mono-axial - dont la direction principale est celle des filaments qui le constituent – et bidimensionnel, dans la mesure où la nappe est plane.

Les NCF (*Non-Crimp Fabric*) appartiennent à la famille des unidirectionnels.

II. 2. c) Tissage 2D⁵

Le tissage est un procédé qui permet d'obtenir une structure textile surfacique bi-axiale par l'entrecroisement à angle droit d'un fil de chaîne et d'un fil de trame.

Suivant le mode d'entrecroisement de ces deux fils, chaîne et trame, aussi appelé « armure », nous obtenons des propriétés et des aspects de tissus différents.

Trois grandes familles d'armure sont distinguées : la toile (aussi appelé « taffetas »), le sergé et le satin. Ces trois armures sont représentées en figure 1-7.

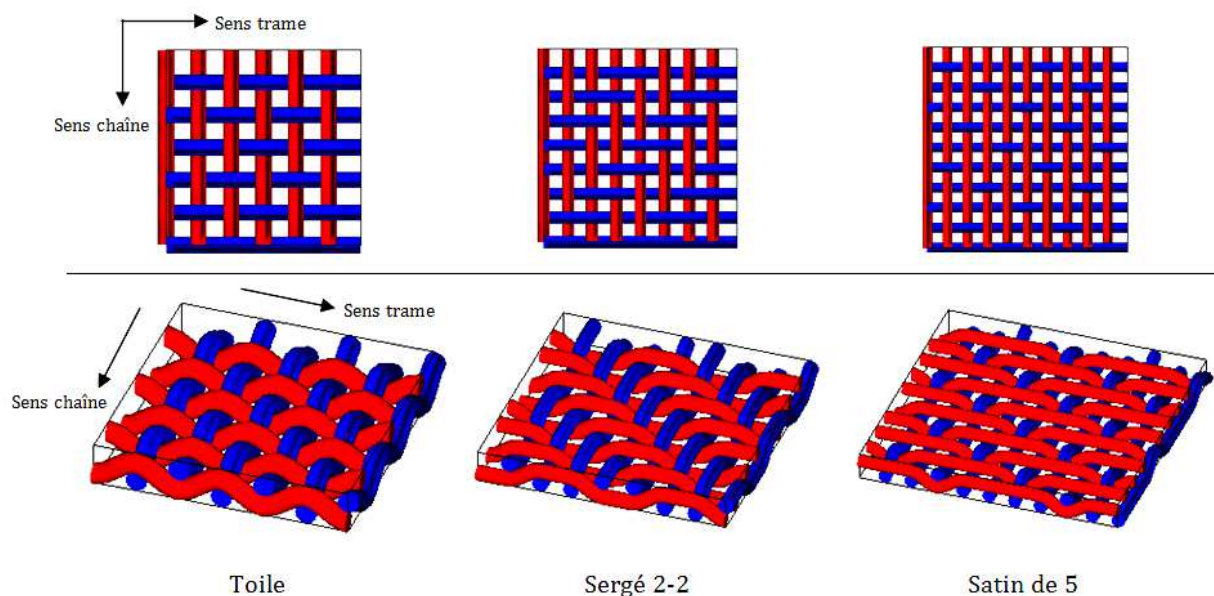


Figure 1-7 Différentes familles d'armures (visuels obtenus avec le logiciel WiseTex®)

⁵ Dans ce paragraphe est utilisé le vocabulaire tisserand, qui emploie le terme de « fil » comme terme générique. Sont alors confondus abusivement les termes de « mèche » et de « fil » (ce dernier étant un cas particulier de mèche retordue).

- L'armure toile est le mode d'entrecroisement le plus simple. Il s'agit d'une structure textile bloquée, peu déformable, compte-tenu de la densité des entrecroisements réalisés [23]. A partir de cette structure de base, nous trouvons plusieurs dérivés de la toile, comme les nattés, les reps ou les cannelés.
- Le sergé est une armure obtenue par la succession de x pris – y laissés par un décalage constant sur chaque colonne, entraînant un effet visuel « d'oblique ».
- L'armure sergé est plus souple que l'armure toile. Elle est très utilisée pour la réalisation de rubans ou de sangles.
 - Le satin est une armure essentiellement constituée de « flottés », c'est-à-dire que le fil n'est pris qu'une fois par motif élémentaire, puis « flotte » jusqu'au point de liage suivant. Cela confère au satin un aspect lisse et brillant.
- Le caractère souple de l'armure satin est apprécié dans le cadre d'une utilisation comme préforme pour les matériaux composites car les tissus obtenus se drapent facilement.

D'autres éléments influencent les caractéristiques du tissu [24] :

- Le nombre de fils de chaîne par centimètre (aussi appelé « compte en chaîne »)
- Le nombre de fils de trame par centimètre (aussi appelé « duitage »)
- Le titre des fils de chaîne
- Le titre des fils de trame
- L'embuvage, qui correspond à la différence de longueur entre le fil de chaîne avant tissage et dans le tissu (ondulation du fil de chaîne)

Le tissage peut se scinder en deux technologies : la mécanique à cadres, et la mécanique Jacquard.

Dans le cas de la mécanique à cadres, plusieurs fils de chaîne travaillent simultanément, répétant la cellule élémentaire (armure) du tissu. Ces fils de chaîne sont portés par un même cadre qui monte et qui descend pour permettre l'entrecroisement avec le fil de trame.

A l'opposé, dans le cas de la mécanique Jacquard, les fils de chaîne peuvent travailler indépendamment les uns des autres. En effet, ils sont commandés séparément. Cette technologie permet d'obtenir des tissus à motif.

Lee *et al.* [25] ont montré que le tissage était responsable d'une chute de 12% des propriétés mécaniques de la mèche de carbone entre le stade fournisseur et le stade tissé. Cette dégradation est imputée selon eux au frottement aux points de contact entre :

- Les fils de chaîne et les pièces de mise en tension ((2) de la figure 1-8) ;
- Les fils de chaîne et les œillets des cadres ((3) de la figure 1-8) ;
- Les fils de chaîne et les dents du peigne de tassage ((5) de la figure 1-8) ;
- Les fils de chaîne et la lance lors de l'insertion de la trame ((4) de la figure 1-8) ;
- Les fils de chaîne et les fils de trame au cours de l'insertion de cette dernière ;
- Les fils de chaîne adjacents lors de l'ouverture de la foule.

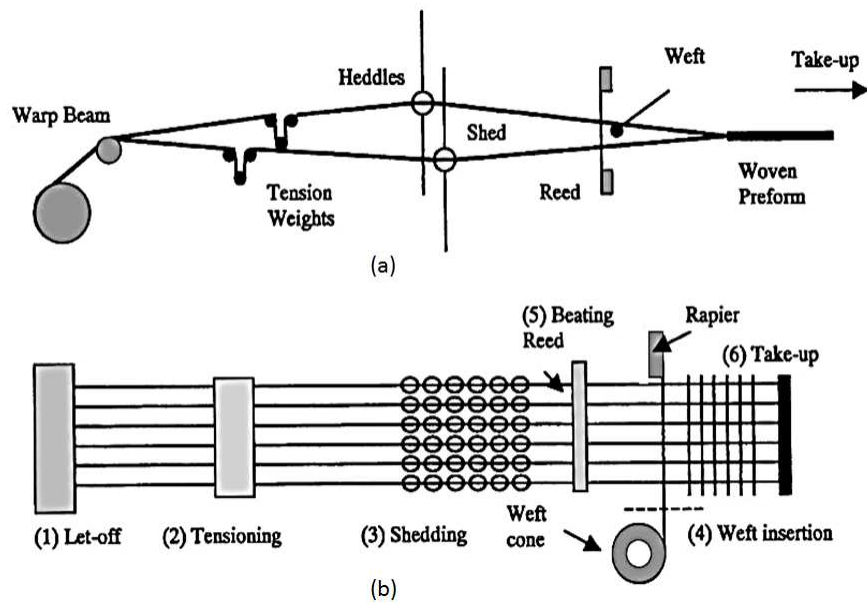


Figure 1-8 Vue schématique de côté (a) et du dessus (b) d'un métier à tisser [25]

II. 2. d) Tricotage 2D

Le tricotage est un procédé qui permet d'obtenir une structure textile surfacique par entrelacement d'un ou de deux fils (mailles).

Il existe deux grandes familles de produits tricotés : la maille cueillie et la maille jetée (voir figure 1-9).

Dans le cas de la maille cueillie, un seul fil forme des mailles avec les mailles de la rangée inférieure. Les produits obtenus sont facilement démaillables lorsque nous tirons sur le fil.

Dans le cas de la maille jetée, plusieurs fils sont entrelacés entre eux pour former des boucles, par colonne. Les produits obtenus sont indémaillables.

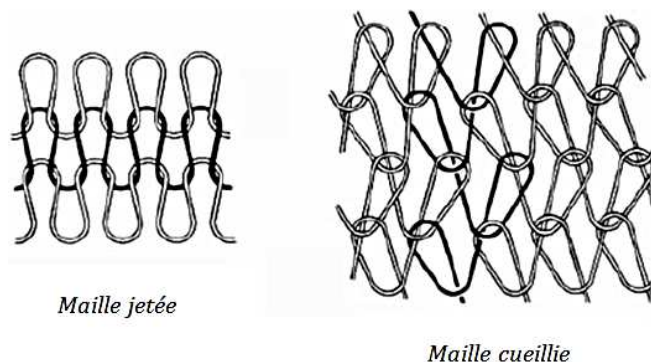


Figure 1-9 Les deux familles de tricots [24]

Les structures tricotées présentent l'avantage d'avoir une très bonne drapabilité, ce qui permet de les utiliser pour réaliser des pièces de géométrie complexe. Cependant, les fibres étant très fortement courbées puisque sous forme de boucles, les propriétés mécaniques obtenues sont

faibles, en comparaison avec les structures tissées ou les UD [26]. Néanmoins, même si leur utilisation reste limitée pour des applications structurales, ils sont tout de même appréciés pour leur bonne tenue à l'impact [27] et leur drapabilité.

Nous parlons de « tricotabilité » d'un fil pour décrire son aptitude à être tricoté. En effet, dans la structure tricotée, le fil est fortement incurvé pour former des boucles. Il doit donc :

- Ne pas être trop raide
- Ne pas être trop fragile
- Être plus ou moins élastique

Autant la fibre de carbone peut être tricotée sous forme de « filé de fibres », autant la mèche de carbone est difficilement tricotable puisque fragile, raide et peu élastique.

Comme pour le mat à fibres coupées, il n'est pas possible de parler d'endommagement par rupture de fibres dans le cas du filé de fibres, puisqu'il s'agit par définition d'un assemblage de fibres coupées.

II. 2. e) Tressage 2D

Par définition, une tresse textile est obtenue par l'entrecroisement de fils disposés en diagonale par rapport au bord du produit.

La machine qui permet d'obtenir ce produit est appelé « tresseuse ». Celle-ci est constituée de plusieurs fuseaux, disposés en cercle. Ces fuseaux sont portés par des « roues-à-ouche », aussi appelées « roues-à-encoches ». Comme schématisé à la figure 1-10, le mouvement rotatif des roues-à-ouches entraîne le déplacement des fuseaux et l'entrecroisement des fils portés par les fuseaux, formant ainsi la tresse.

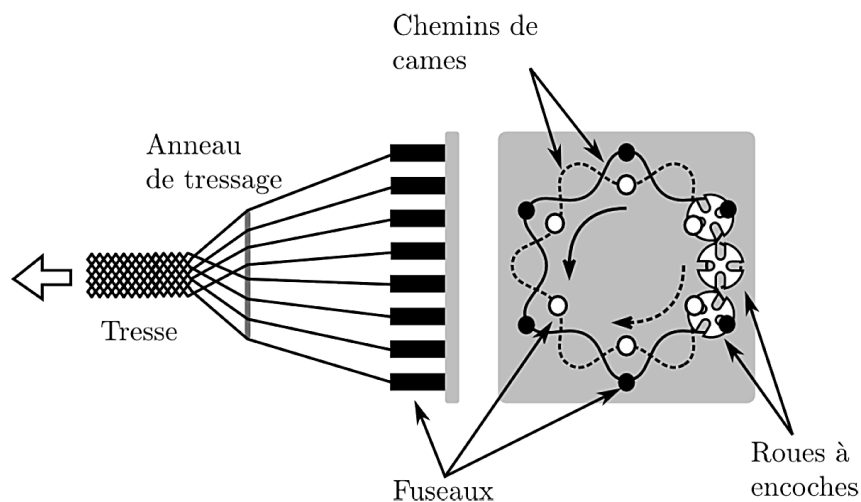


Figure 1-10 Principe de fonctionnement d'une tresseuse horizontale [28]

Contrairement au tissage 2D, qui ne permet d'obtenir que des fibres orientées à 0° et 90° , le tressage permet de produire des structures textiles dont les fibres sont orientées à $\pm\alpha$ qui est l'angle de tressage en degré. Cet angle dépend du rapport entre la vitesse de rotation des

bobines et la vitesse de tirage. Des fils longitudinaux peuvent être intégrés, aussi appelés « montants » à 0° , afin d'obtenir des tresses tri-axiales. Nous obtenons ainsi des tresses bi-axiales (voir figure 1-11), mais aussi tri-axiales.

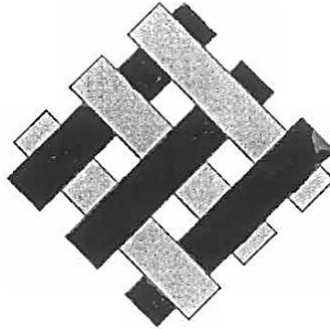


Figure 1-11 Schéma d'une tresse [29]

Le tressage sur mandrin consiste à insérer un mandrin aux formes plus ou moins complexes, au point de tressage (voir figure 1-12). Le tressage a pour avantage de s'adapter, à travers l'angle de tressage et la vitesse de production, aux formes complexes du mandrin, et d'obtenir un tressage « en forme ».

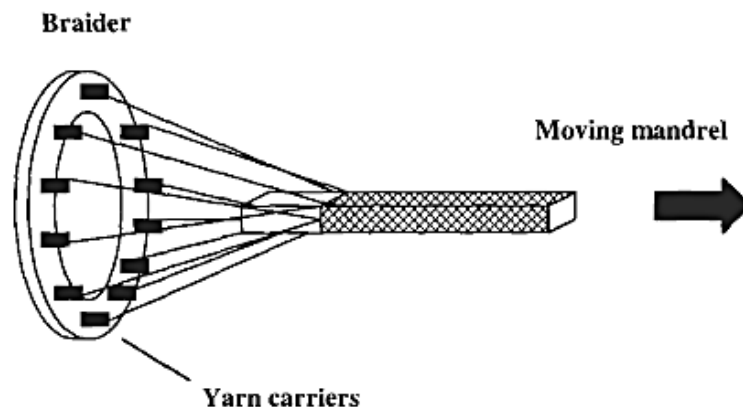


Figure 1-12 Schéma du tressage en forme [29]

Bien que le tressage soit de plus en plus utilisé pour réaliser des renforts, il présente encore de nombreux inconvénients comparés à d'autres procédés. Entre autres, nous ne pouvons obtenir que de relatives petites préformes comparées à la taille de la machine. D'autre part, la longueur de préforme réalisable par tressage avant de ré-alimenter à nouveau les bobines est faible compte-tenu du fait que ces dernières sont en déplacement constant et doivent donc être peu encombrantes, légères et maniables.

Falzon *et al.* [30] ont montré que l'endommagement subi par la mèche de carbone au cours du procédé de tressage était responsable d'une chute de 20% de sa résistance à rupture.

II. 3) Structures tridimensionnelles

II. 3. a) Stratifiés

Un pli est un terme qui peut désigner soit une nappe de mèches de carbone orientées selon la même direction (UD), soit un tissu, soit toute autre structure 2D.

Un stratifié est une superposition de plis, orientés selon des angles différents (voir figure 1-13). Cette superposition peut être consolidée chimiquement (résine) ou mécaniquement (couture ou aiguilletage).

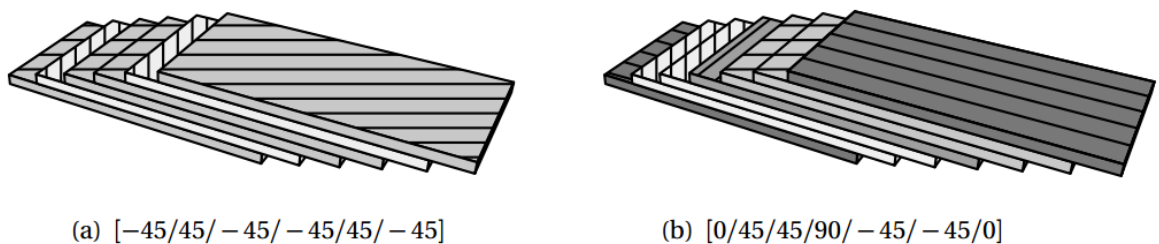


Figure 1-13 Exemples de stratifiés [31]

Tong *et al.* ont montré que les UD avaient pour inconvénient d'avoir une faible résistance mécanique dans le sens de l'épaisseur [29].

La phénoménologie de la dégradation des composites stratifiés a notamment été décrite par Trovalet [32]. Les principaux cas de rupture de fibres ont lieu lorsque les plis du stratifié sont sollicités dans le sens des fibres, en traction ou en compression. Dans le cas particulier de la compression, il est observé un flambage des fibres, qui conduira à la formation de kink-bands (zones de doubles pliures) représentés sur la figure 1-14 b).

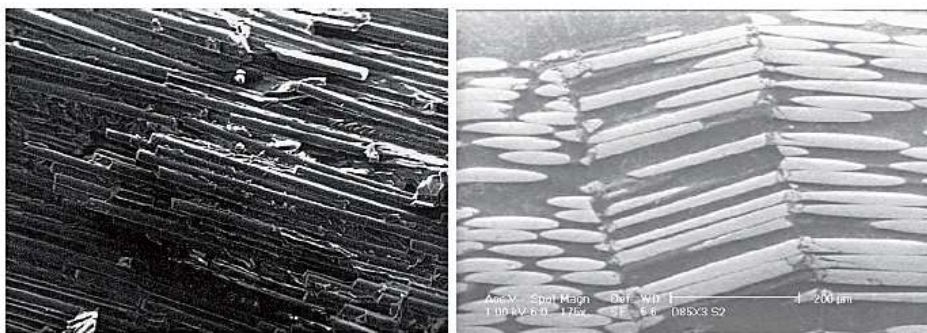


Figure 1-14 (a) Rupture de fibre en traction [33]

(b) Rupture de fibre en compression [34]

Argon [35] a montré que le procédé de fabrication des plis avaient une influence directe sur l'alignement des fibres et donc sur les propriétés de résistance du pli.

II. 3. b) Tissage 3D

Il est possible d'obtenir avec le procédé de tissage des produits surfaciques ou volumiques. Les tissus volumiques sont appelés « tissus interlock ». Ils sont obtenus en superposant plusieurs couches de fils de trame, liés entre eux par les fils de chaîne.

Selon le mode de liage, on distingue trois familles de tissus interlock, représentés en figure 1-15 :

- Layer-to-layer ou couche-à-couche, où les fils de chaîne ondulent d'un nombre de couches d'empilement de fils de trame, inférieur au nombre total de couches, mais supérieur à 2 ;
- Diagonal, où les fils de chaîne ondulent à travers toutes les couches du tissu, en diagonal ;
- Orthogonal, où les fils de chaîne traversent toutes les couches du tissu à angle droit.

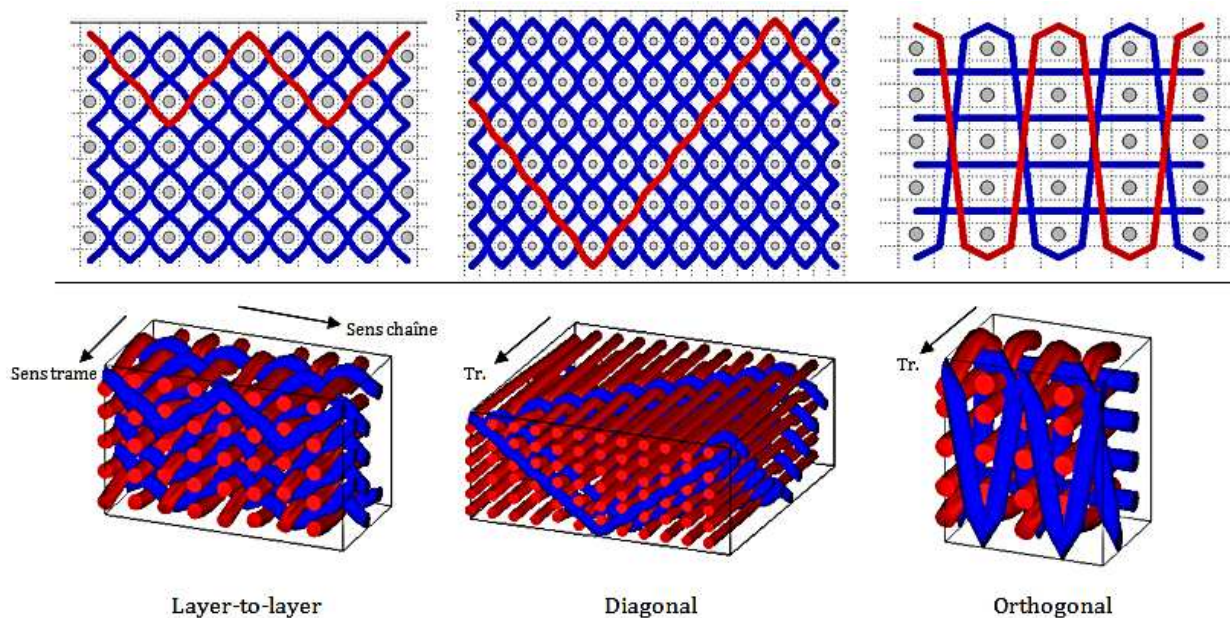


Figure 1-15 Différents types de liage interlock

Le nombre de couches peut aller jusqu'à 20 selon les procédés utilisés, pour obtenir des épaisseurs allant de 2 à 10 mm [23].

Les préformes obtenues en utilisant le tissage 3D ont pour caractéristiques d'avoir de bonnes résistances en compression et au délaminage.

II. 3. c) Tressage 3D

Comme pour le tissage 3D, le tressage tridimensionnel consiste à produire des tresses superposées, liées entre elles par un entrelacement couche à couche. Cette technique permet d'améliorer la résistance au délaminage, en comparaison avec des tresses 2D superposées.

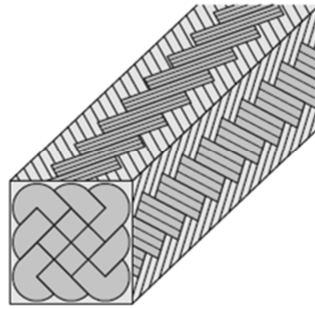


Figure 1-16 Tressage carré [22]

Il existe également des technologies dites de tressage cartésien. Elles permettent d'obtenir des tresses carrées ou rectangulaires (figure 1-16), où les fils traversent toute l'épaisseur de la structure. Les produits obtenus ont un taux de fibres important et une très bonne résistance à l'abrasion. [24]

II. 3. d) Tricotage 3D

A titre indicatif, le tricotage 3D consiste en plusieurs tricots réunis par un fil de liaison en Z, comme représenté en figure 1-17.

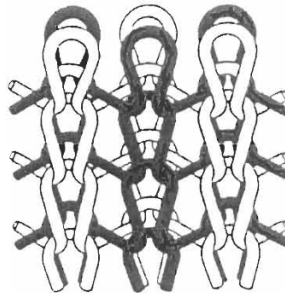


Figure 1-17 Tricotage multicouche [29]

Les structures obtenues ont un taux de fibres faible [22]. Elles sont principalement utilisées pour des applications d'isolation, particulièrement appréciées pour leur légèreté et leur déformabilité.

Comme pour le tricotage 2D, la fibre de carbone est utilisée sous forme de filés de fibres. Nous ne parlerons donc pas de dégradation par rupture de fibres. Il s'agit davantage d'une désolidarisation des filaments entre eux.

II. 3. e) Conclusion

Les procédés de transformation qui permettent de passer de la mèche au renfort du matériau composites sont variés. Ils répondent aux exigences de comportement mécanique du matériau final associé. Comme présenté dans ce paragraphe, ils sont responsables dans des proportions variables d'un endommagement parfois non négligeable de la mèche.

Dans le paragraphe suivant sont présentées les techniques de quantification de cet endommagement.

III) Caractérisation de l'endommagement

L'endommagement, dans sa définition générale, est conventionnellement décrit comme une progressive détérioration du matériau due à l'apparition et la croissance de discontinuités locales de la matière, sous forme de fissure(s) et/ou de cavité(s), pouvant mener à la rupture. [36]

L'aspect multi-échelles de ce phénomène le rend particulièrement complexe à appréhender. Il se complique davantage avec les matériaux hétérogènes, tels que les matériaux composites.

A l'échelle microscopique, soit l'échelle de la fibre, l'endommagement correspond à une rupture de liaisons chimiques.

A l'échelle mésoscopique, soit l'échelle de la mèche, c'est-à-dire un ensemble de plusieurs milliers de fibres, l'endommagement correspond à des ruptures de fibres, individuelles, ou collectives, à de l'ondulation, ou à du désalignement de fibres.

A l'échelle macroscopique, soit l'échelle de la préforme fibreuse, de la mèche imprégnée ou du matériau composite, l'endommagement correspond à de la fissuration matricielle, de la décohésion fibre/matrice, ou à du délaminage.

La figure 1-18 schématise ces différents phénomènes.

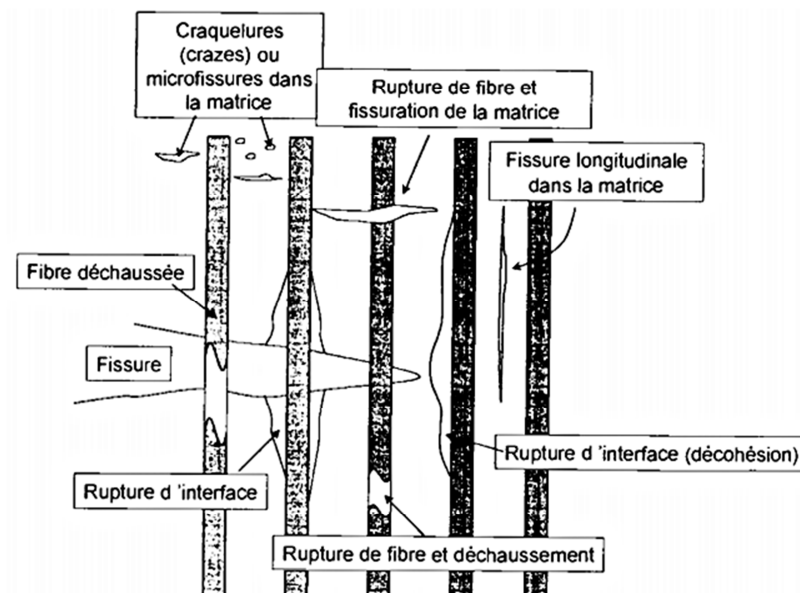


Figure 1-18 Différents types de dégradation d'un matériau composite à renfort fibreux [37]

Dans ce paragraphe seront détaillées les méthodes qui permettent d'identifier, de prédire et/ou de quantifier l'endommagement à l'échelle de la mèche de carbone. Les techniques qui servent à

identifier les défauts à l'échelle du composite (fissuration matricielle par exemple) ne sont pas abordées dans ce chapitre.

III. 1) Echelle microscopique

L'endommagement à l'échelle microscopique, en l'occurrence les fissures qui découlent des ruptures de liaisons chimiques, sont des phénomènes irréversibles.

III. 1. a) Prédiction : la statistique de Weibull

La statistique de Weibull permet de prédire l'amorçage de défauts qui vont conduire à des fissures. Cette approche statistique se base sur le fait que les fibres de carbone ont un comportement élastique-fragile. La prédiction de la rupture des fibres est liée à la distribution statistique des défauts initialement présents dans les fibres.

La fibre est considérée comme un ensemble de maillons, assemblés les uns aux autres (voir figure 1-19). La fibre est alors rompue lorsque le maillon le plus faible se rompt.

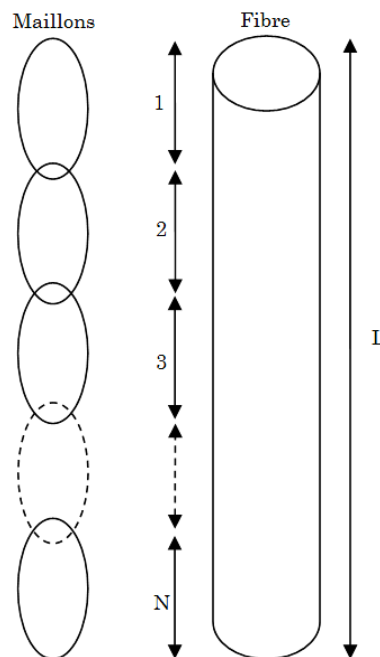


Figure 1-19 Modélisation de la fibre sous la forme d'un assemblage de maillons

Ainsi nous considérons que la fibre est constituée de N segments dans lesquels la contrainte appliquée est supposée uniforme et égale à σ_i . La probabilité $F(\sigma_i)$ qu'un segment rompe sous la contrainte σ_i est associée à la fonction de densité de probabilité $f(\sigma)$ définie par [38] la formule (I.1).

$$F(\sigma_i) = \int_0^{\sigma_i} f(\sigma) d\sigma \quad (I.1)$$

Par conséquent, si σ_r est la résistance théorique à rupture du matériau, nous aurons donc $F(\sigma_r)=1$.

Par opposition, la probabilité qu'un maillon ne rompe pas sous la contrainte σ_i est égale à $1 - F(\sigma_i)$. La fibre étant composée de cet assemblage de N maillons, la probabilité R pour que la fibre ne rompe pas est donnée par :

$$\begin{aligned} R &= \prod_{i=1}^N (1 - F(\sigma_i)) \\ &= (1 - F(\sigma))^N \end{aligned} \quad (I.2)$$

Cette relation s'applique dans le cas où toutes les contraintes sont uniformes et égales à σ .

La probabilité $P_r(\sigma)$ pour que la fibre rompe sous la contrainte σ est donc égale à :

$$P_r(\sigma) = 1 - (1 - F(\sigma))^N \quad (I.3)$$

En appliquant l'approximation de Poisson⁶, nous obtenons alors :

$$P_r(\sigma) = 1 - \exp(-NF(\sigma)) \quad (I.4)$$

Afin de déterminer cette probabilité $P_r(\sigma)$, il faut trouver la fonction $\Phi(\sigma)$ qui répond à :

$$NF(\sigma) = L\Phi(\sigma) \quad (I.5)$$

Weibull a proposé une résolution pour cette équation [39] à savoir :

$$\begin{aligned} \Phi(\sigma) &= \frac{(\sigma - \sigma_u)^m}{\sigma_0} \quad \text{lorsque } \sigma > \sigma_u \\ \Phi(\sigma) &= 0 \quad \text{lorsque } \sigma \leq \sigma_u \end{aligned} \quad (I.6)$$

Avec σ_u la contrainte minimale pour qu'il y ait rupture, σ_0 un facteur d'échelle, qui n'a pas de sens physique et m , aussi appelé « module de Weibull » un paramètre lié à la largeur de la distribution. Lorsque m augmente, la fonction $P_r(\sigma)$ tend vers une fonction créneau pour laquelle l'ensemble des éprouvettes rompent à une valeur de contrainte donnée [40].

La probabilité de rupture, d'après la statistique de Weibull, suit donc une courbe de la forme donnée en

figure 1-20.

⁶ Soit $\lim_{n \rightarrow \infty} (1 - \frac{x}{n})^n = \exp(-x)$.

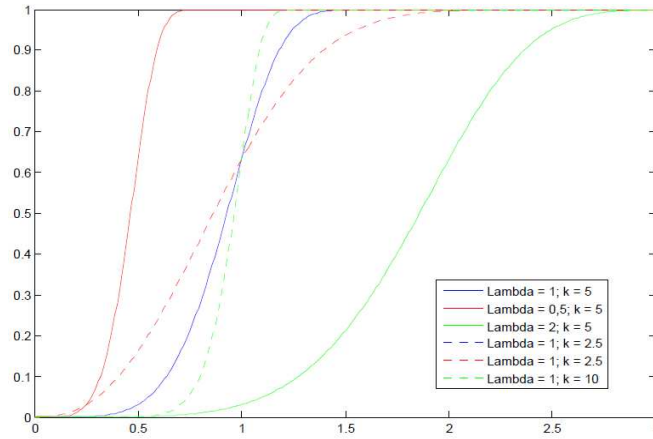


Figure 1-20 Fonction de répartition de Weibull

En pratique, le seuil de rupture σ_u est très faible et peut être approximé comme nul [38]. Nous avons donc :

$$\begin{aligned}\Phi(\sigma) &= \frac{(\sigma)^m}{\sigma_0^m} \text{ lorsque } \sigma > \sigma_u \\ \Phi(\sigma) &= 0 \text{ lorsque } \sigma \leq \sigma_u\end{aligned}\quad (I.7)$$

D'où :

$$\begin{aligned}\Pr(\sigma) &= 1 - \exp(-NF(\sigma)) = 1 - \exp(-L\Phi(\sigma)) = 1 - \exp\left(-L\frac{(\sigma)^m}{\sigma_0^m}\right) \text{ lorsque } \sigma > \sigma_u \\ \Pr(\sigma) &= 1 \text{ lorsque } \sigma \leq \sigma_u\end{aligned}\quad (I.8)$$

Appliquée à une mèche de section A_M , constitué de N fibres, soumise à une charge P_M , l'application de la statistique de Weibull permet d'écrire :

$$P_M = \sigma_f A_M \exp\left(-L\left(\frac{\sigma_f}{\sigma_0}\right)^m\right) \quad (I.9)$$

Avec σ_f la contrainte appliquée aux fibres non-rompues.

Or, il y a rupture de la mèche lorsque celle-ci n'est plus capable de supporter un accroissement de la force quand la déformation ε augmente, soit :

$$\frac{dP_M}{d\varepsilon_M} = \frac{dP_M}{d\varepsilon_f} = \frac{dP_M}{d(E_f \sigma_f)} \quad (\text{d'après la loi de Hooke}) \quad (I.10)$$

Avec E_f le module en traction d'une fibre de la mèche.

Par conséquent, la contrainte maximale σ_M^{max} supportée par la mèche est égale à :

$$\sigma_M^{max} = \sigma_0 (Lm)^{-\frac{1}{m}} \exp\left(-\frac{1}{m}\right) \quad (I.11)$$

Sur la figure 1-21, nous distinguons les ruptures successives sous force croissante, de la première fibre (singlet), deuxième fibre (doublet), jusqu'à la rupture de K fibre (K-plets) pour atteindre la rupture finale de la mèche.

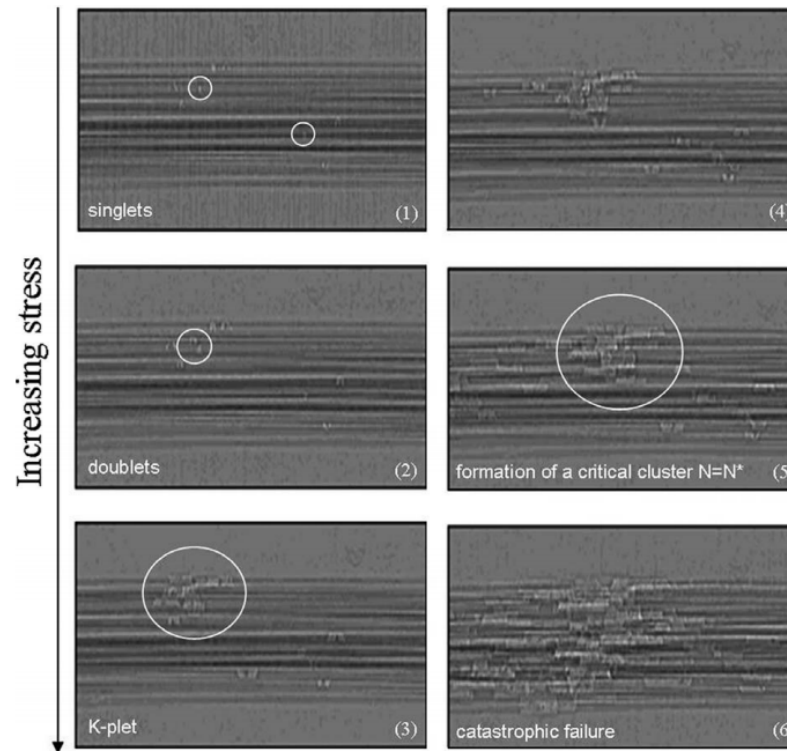


Figure 1-21 Evolution de l'endommagement d'un composite quartz-époxy sous contrainte, observée par tomographie à rayons X [41]

III. 1. b) Observation par microscope électronique à balayage (MEB)

Le microscope électronique à balayage est un outil très fréquemment utilisé pour l'observation de la topographie des filaments, mais aussi de leurs facies de rupture. La figure 1-22 présente un exemple d'observation faite sur un composite graphite/époxy après rupture.

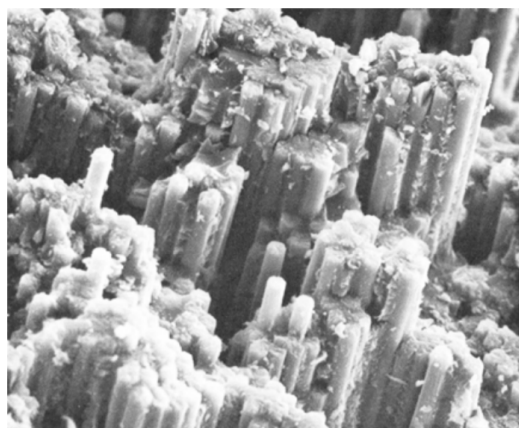


Figure 1-22 Faciès de rupture fibre graphitisée/epoxy [42]

L'observation du faciès de rupture fournit de nombreux renseignements et, couplée à d'autres méthodes, comme l'étude par émission acoustique, elle permet d'analyser les derniers stades ayant menés à la rupture [43] :

- Nature des particules responsables de la génération de porosités : forme, taille, répartition, comportement ductile ou fragile ;
- Mode de rupture : arrachement ou cisaillement.

Dans le cas d'un composite, le MEB permet d'identifier [44] :

- Dans la matrice : des fissures ou des zones de rupture ;
- A l'interface fibre/matrice : des décohésions fibre/matrice et des déchaussements de fibres.

Un exemple de résultats obtenus par observation au MEB est donné à la figure 1-23.

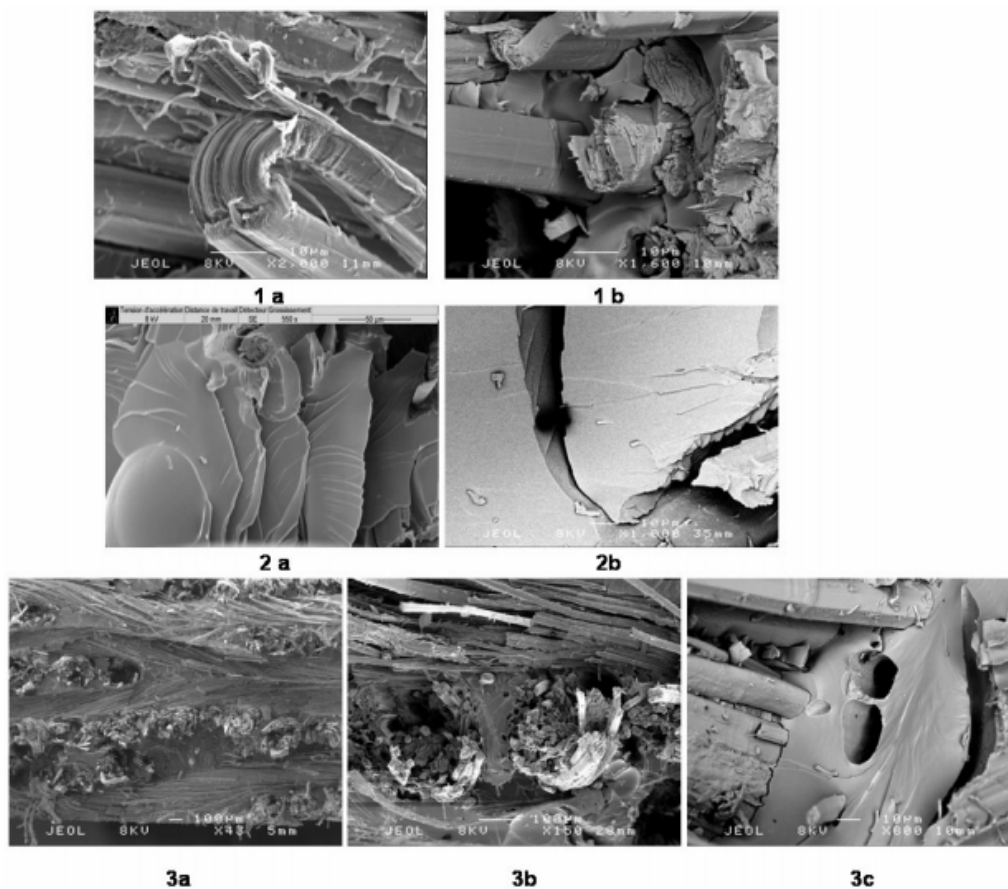


Figure 1-23 Observations au MEB des faciès de rupture dans les composites tissés chanvre/epoxy [44]
[0/90]° : endommagements des renforts fils de chanvre (1a,1b), matriciels (2a,2b), à l'interface renfort/matrice (3a,3b,3c).

III. 1. c) Observation par tomographie à rayon X

La tomographie à rayon X est une méthode de contrôle non-destructif. Elle permet d'obtenir une image en 3D d'un objet volumique à partir de vues en coupe, obtenues par l'interaction d'un faisceau de rayons X avec la matière [45]. La combinaison de plusieurs vues, sous différentes

orientations permet de calculer et de construire une image numérique de l'objet étudié (voir figure 1-24).

Appliquée au domaine des matériaux composites, la tomographie permet d'observer plusieurs échelles caractéristiques, du filament, au renfort, en passant par la mèche, sans avoir nécessairement besoin de résiner cette dernière pour en obtenir une vue en coupe.

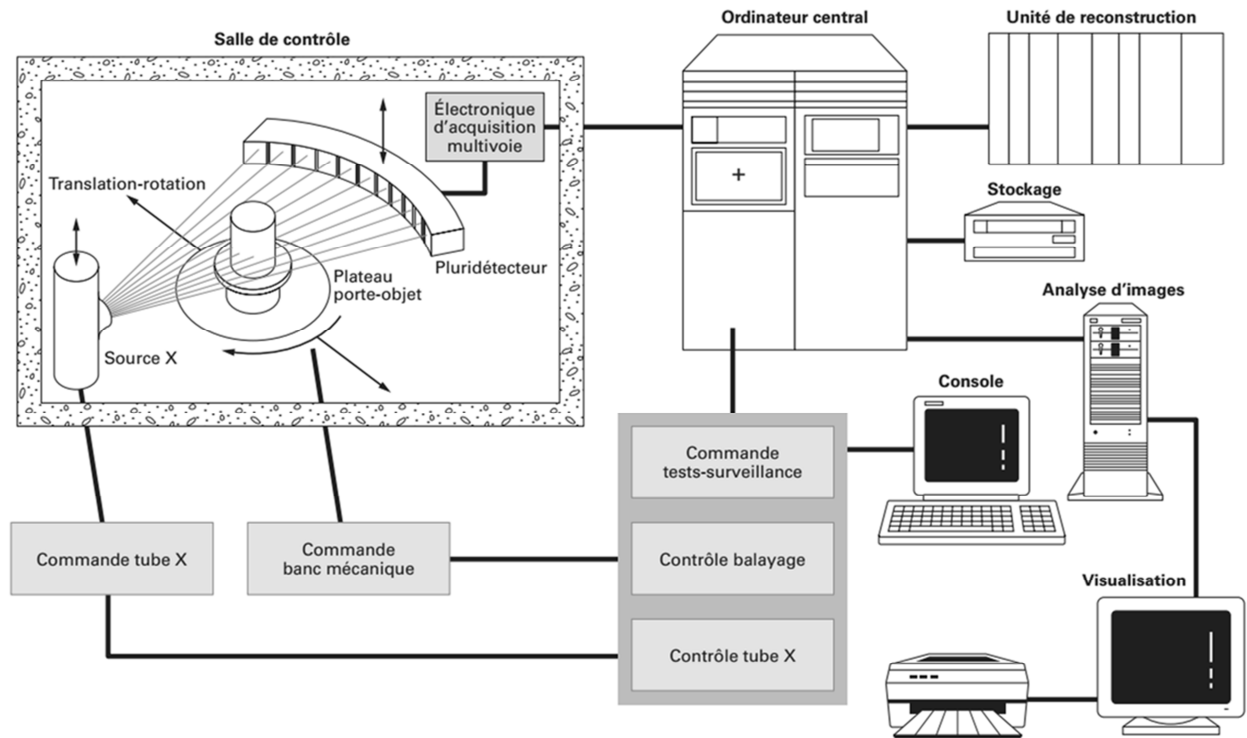


Figure 1-24 Schéma de fonctionnement d'un tomographe industriel à rayon X [45]

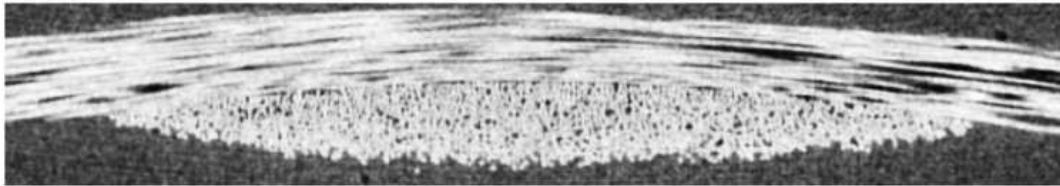
Suivant la source de rayons X utilisée, et la distance entre cette dernière et l'objet à étudier, il est possible d'ajuster la résolution. Ainsi, dans le cas des appareils industriels de haute énergie, la résolution moyenne va de 50 μm à 300 μm [45], mais peut atteindre des valeurs beaucoup plus élevées dans le cas de microtomographie ou de nanotomographie sur des volumes d'étude plus réduits.

Ces résolutions sont généralement exprimées en taille d'arête de voxel. Le voxel est un terme qui désigne un **volume element**, par analogie au pixel, **picture element**. Il s'agit en fait d'un pixel volumique. L'information contenue dans un voxel est directement liée à la résolution de la machine utilisée.

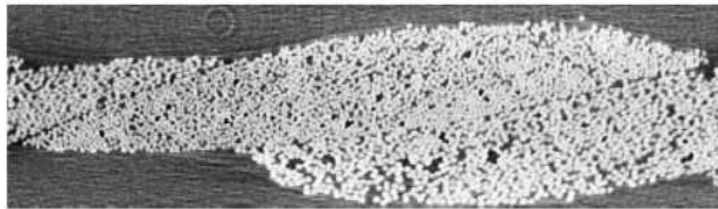
La microtomographie est largement utilisée à l'échelle mésoscopique pour étudier la géométrie à cœur des renforts secs, ou bien la déformabilité en temps réel du renfort sous contrainte, comme dans la figure 1-25.



a. Section initiale d'une mèche du renfort



b. Section d'une mèche du renfort sous tension biaxiale



c. Section d'une mèche du renfort cisailé

Figure 1-25 Sections de mèche de renfort d'un tissu toile, observées avec une résolution de $2,85\ \mu\text{m}$ à $5\ \mu\text{m}$ [46]

La microtomographie a aussi été utilisée pour étudier les mécanismes de rupture à l'échelle de la mèche et notamment pour valider et affiner les lois de prédiction qui sont généralement proposées (cf. chapitre I §III. 1. a) quant aux ruptures de fibres.

D. Raz-Ben Aroush *et al.* ont étudié l'évolution d'un faisceau de 125 fibres de quartz, imprégnées d'une résine époxy, avec l'utilisation d'un tomographe à rayons X haute densité. Au cours d'un essai de traction, plusieurs clichés ont été réalisés afin d'observer le comportement des fibres à la rupture (voir figure 1-26).

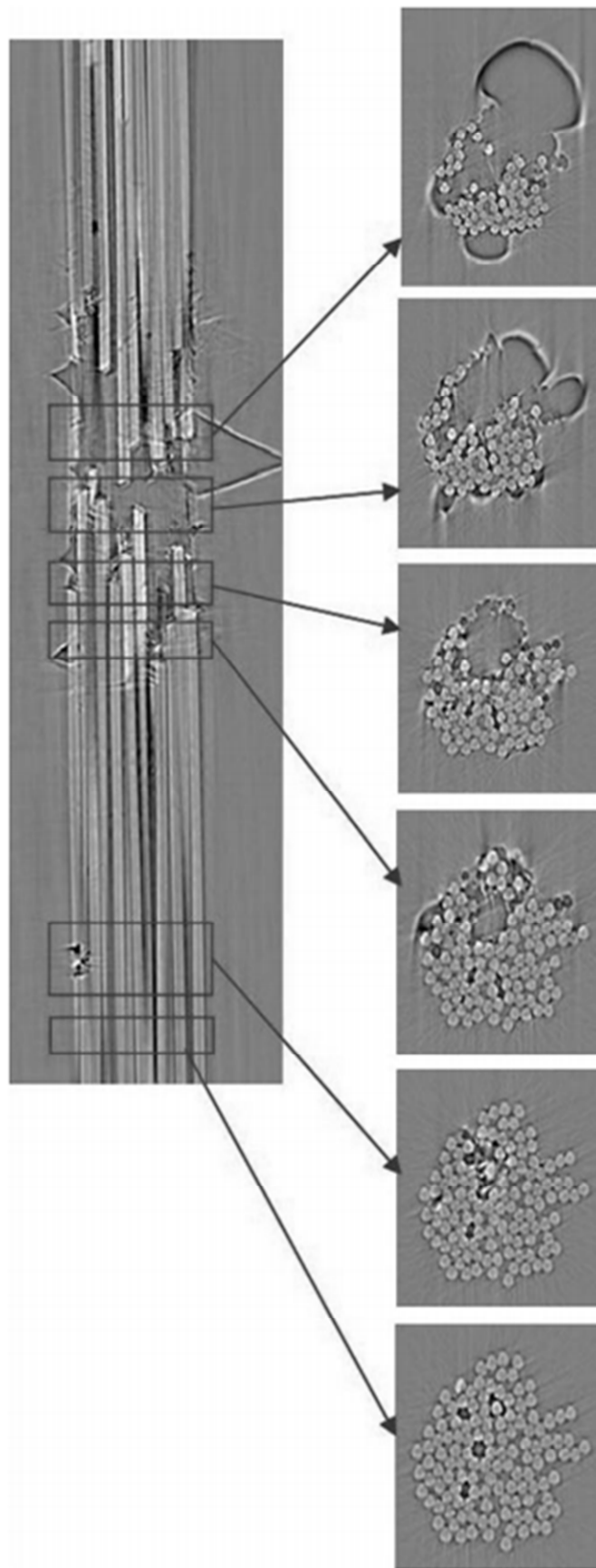


Figure 1-26 Vues en coupe d'un composite quartz/epoxy fracturé obtenues par tomographie à rayons X [41]

III. 1. d) Comptage des fibres par microscopie en contraste de phase

Cette méthode [47] permet de comptabiliser les fibres présentes dans l'air. Elle est surtout utilisée pour quantifier les fibres nocives pour la santé, présentes dans l'environnement de travail.

Les fibres retenues pour le comptage sont celles les plus dangereuses pour la santé, à savoir celles qui sont longues et fines, c'est-à-dire celles dont la longueur est supérieure à $5\mu\text{m}$ et dont le rapport longueur/largeur est supérieur à 4 et de largeur au plus égale à $3\mu\text{m}$. En effet, à partir de ce rapport d'aspect, les fibres peuvent pénétrer dans les voies respiratoires et donc être nocives pour la santé.

Cette méthode ne permet cependant pas d'identifier la nature des fibres comptabilisées.

Les fibres présentes dans l'air sont prélevées sur une membrane filtrante en ester de cellulose ou en nitrate de cellulose (dont les pores ont un diamètre inférieur ou égal à $1,2\mu\text{m}$), qui est ensuite rendue transparente par de l'acétone, puis traitée au triacétate de glycérol. La membrane est ensuite analysée au microscope optique à contraste de phase.

La concentration de fibres filtrées pour chaque prélèvement est donnée par la formule suivante :

$$C = \frac{S_{eff}}{S_{ret}} \times \frac{N}{n} \times \frac{1}{V} \quad (\text{I.12})$$

Avec :

C (fibres/ cm^3) :	Concentration de fibres
S_{eff} (en mm^2) :	Surface effective de filtration
S_{ret} (en mm^2) :	Surface du réticule
N :	Nombre total de fibres comptées
n :	Nombre de champs observés
$V(\text{cm}^3)$:	Volume d'air prélevé

III. 2) Echelle mésoscopique

III. 2. a) Essais de traction sur mèche imprégnée

Les recommandations pour réaliser l'essai de traction sur mèche de carbone imprégnée sont données par la norme européenne NF EN ISO 10618.

Cette méthode permet de déterminer la résistance en traction, le module d'élasticité en traction et la déformation à la charge maximale d'une éprouvette de mèche de carbone imprégnée de résine.

Le diagramme contrainte-déformation qui en résulte permet d'identifier les différentes étapes de la rupture [48] :

- La partie élastique linéaire (AB) qui répond à la loi de mélange fibres/matrice.

- La partie (BC) qui correspond à la rupture progressive des fibres. Celle-ci s'accompagne d'un phénomène de délaminage. Lorsque la contrainte ultime σ_{UT} est atteinte, une macrofissure se développe le long d'une des fissures matricielles existantes et s'accompagne d'une rupture des fibres dans le voisinage.

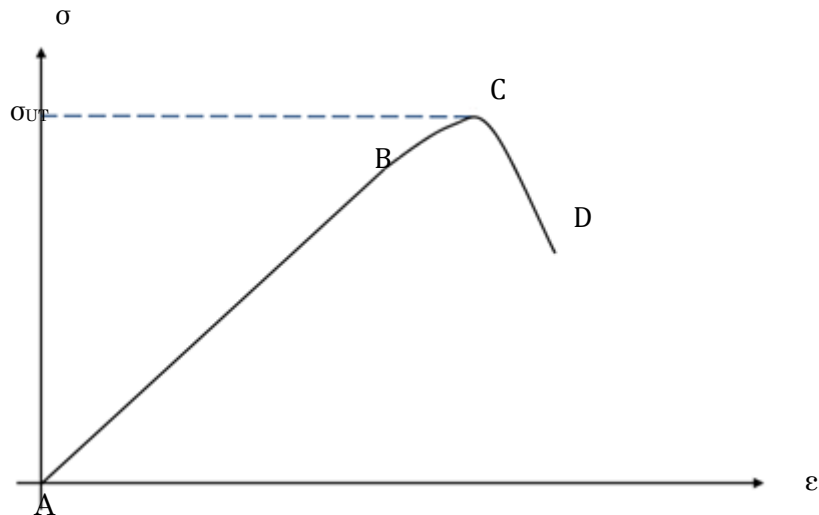


Figure 1-27 Comportement schématisé d'un composite Carbone/époxy en traction

- Au point D, la majorité des fibres sont cassées et l'essai s'arrête.

Dans le cadre de l'étude de l'endommagement des mèches de carbone, l'essai de traction sur mèche imprégnée permet d'effectuer un suivi des propriétés mécaniques en traction au cours d'un procédé de transformation textile. Cela fournit un renseignement sur la quantité de filaments non-rompus, et donc « travaillants ». Il s'agit d'une méthode de contrôle destructive.

III. 2. b) Examen visuel et contrôle optique automatique

III. 2. b. (i) Examen visuel

L'examen visuel est en général le premier des contrôles, mais aussi le plus simple. C'est celui qui permet de réaliser un premier « diagnostic » rapide afin de s'orienter vers des méthodes d'analyse de l'endommagement plus performantes.

III. 2. b. (ii) Acquisition d'images

Plusieurs instruments d'optique permettent d'acquérir l'image qui sera ensuite traitée automatiquement par analyse d'images. Le choix de cet appareillage dépend principalement :

- De l'échelle d'étude recherchée ;
- De la résolution à atteindre ;
- De la rapidité d'acquisition et de l'encombrement pour des applications in-situ.

De manière générale, l'éclairage est un facteur déterminant dans l'acquisition satisfaisante d'une image. En fonction de la nature des défauts qui sont recherchés, différents types d'éclairage peuvent être appliqués [49] :

- Un éclairage diffus, pour la recherche de défauts en général ;
- Un éclairage directif, pour la recherche de défauts type rayure ;
- Un éclairage rasant, pour les défauts « à relief ».

Dans le cas de la mèche de carbone, la question de l'éclairage est problématique. En effet, la fibre de carbone est très absorbante. Par conséquent, obtenir une image suffisamment nette dans son ensemble est une opération délicate.

A l'échelle de la mèche, les appareils qui peuvent être utilisés sont :

- La loupe binoculaire, qui permet d'obtenir un grossissement compris généralement entre 1,5 et 20 ;
- L'appareil photographique, qui permet d'obtenir des images dont la résolution est toujours plus élevée ;
- Eventuellement, le microscope optique pour l'observation de vue en coupe de mèches imprégnées.

III. 2. b. (iii) Traitement d'images

Le traitement d'images automatisé permet d'améliorer la répétabilité de la mesure de défauts.

Néanmoins, il nécessite en premier lieu d'avoir parfaitement identifié les critères optiques de l'endommagement, comme Schneider *et al.* pour les NCF, critères présentés en figure 1-28.

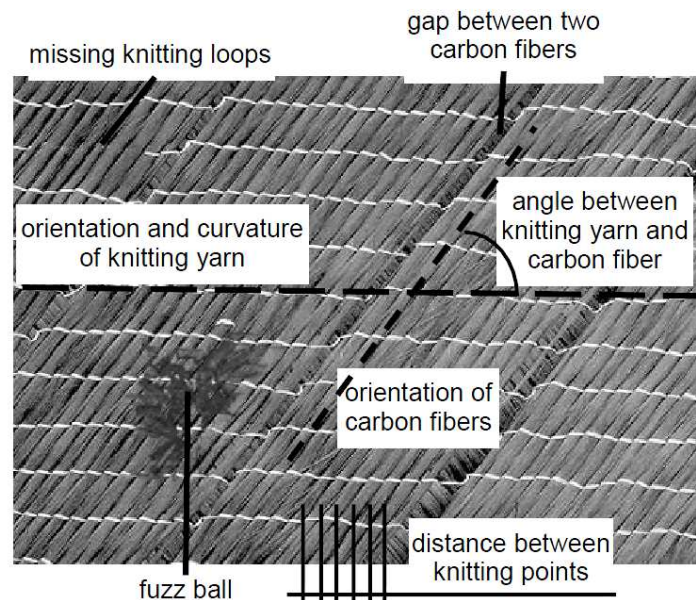


Figure 1-28 Exemples de défauts sur un NCF (Non-Crimp Fabric) [50]

III. 2. c) Vérification du titre

Le titre ou masse linéique des mèches de carbone est généralement exprimé en tex. Cette unité correspond à la masse en gramme d'un kilomètre de fil.

Une modification du titre peut permettre, de manière assez grossière, de déceler une perte de filaments.

Cet essai est normalisé. Les conditions d'essais sont données par la norme NF EN ISO 1889 [51].

Une longueur donnée de mèche est prélevée au moyen d'un dévidoir. Cette longueur dépend de la masse linéique nominale de la mèche, donnée dans la table 1-6. La longueur de l'éprouvette doit être telle que sa masse soit supérieure à 0,25 g.

Masse linéique nominale, Tt (tex)	Longueur de l'éprouvette (m)
Tt < 50	Longueur telle que la masse soit > 0,25 g
50 < Tt < 125	5
125 < Tt < 250	2
250 < Tt	1

Table 1-6 Détermination de la longueur de l'éprouvette suivant la masse linéique nominale de la mèche [51]

Cet essai peut être réalisé sur mèche désensimée. Deux méthodes sont possibles dans le cas de la mèche de carbone pour retirer l'ensimage : la méthode par extraction [52] ou la méthode par pyrolyse [53].

Si l'essai est réalisé sur mèche ensimée, alors celle-ci doit être préalablement séchée afin que son taux d'humidité soit inférieur à 0,2% à l'endroit du prélèvement.

III. 2. d) Mesure de défaut par ultrasons

Le contrôle par ultrasons est majoritairement utilisé pour détecter des défauts à l'échelle de la pièce composite et notamment [54] :

- des délaminages, c'est-à-dire des décohésions entre la fibre et la matrice ;
- des corps étrangers ;
- de la porosité, qui correspond généralement à des micro- ou macro-cavités emprisonnées dans la résine ;
- des défauts de collage.

Il existe deux techniques de contrôle par ultrasons : par transmission et par réflexion. Celle qui est généralement utilisée dans le cas des composites à renfort carbone est la méthode de contrôle par réflexion (voir figure 1-29).

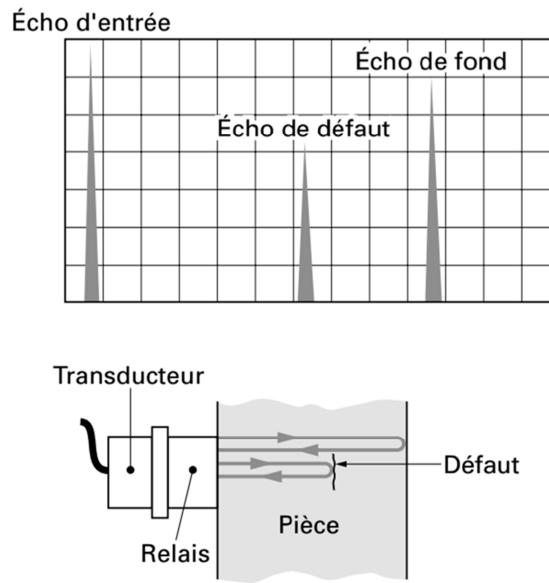


Figure 1-29 Principe de la détection de défauts par US par réflexion [54]

Un transducteur émet une onde ultrasonore longitudinale. Celle-ci va se propager dans le matériau. A chaque discontinuité rencontrée, une partie de cette onde va se réfléchir et être détectée par le transducteur, qui devient alors récepteur. La mesure de l'intervalle de temps entre l'émission et la réception du signal donne une information sur la position du défaut dans l'épaisseur. L'amplitude et la forme du signal reçu renseignent sur la nature et la dimension du défaut.

Un agent couplant (généralement de l'eau ou du gel) est nécessaire pour permettre la propagation des ondes dans la pièce.

A l'échelle de la mèche, c'est la méthode par transmission qui prédomine. Elle reste néanmoins très peu utilisée à cause de son manque de fiabilité dû à de nombreuses incertitudes liées notamment à la difficulté d'alignement, de mise en contact des capteurs, etc...

Le principe de cette méthode repose sur l'utilisation d'un transducteur piézoélectrique, mis au contact de la mèche, qui génère des vibrations ultrasonores. Un deuxième transducteur piézoélectrique joue le rôle de récepteur. L'enregistrement des temps de propagation permet de calculer les constantes élastiques de la mèche, sachant que c_L et c_T sont les célérités des ondes longitudinales et transversales dans un milieu étendu, données par les relations suivantes :

$$c_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}$$

Avec E le module d'élasticité, ν le coefficient de Poisson et G le module de cisaillement.

III. 2. e) Mesure de défaut par conductivité électrique

La méthode par conductivité électrique est utilisée de manière générale pour détecter les défauts sur un fil. Ce fil est placé entre un condensateur et les changements de capacité de celui-ci sont enregistrés (voir figure 1-30).

Un changement de masse du diélectrique (matériaux non conducteur) change la capacité du condensateur - ce changement étant proportionnel au poids du matériau [55].

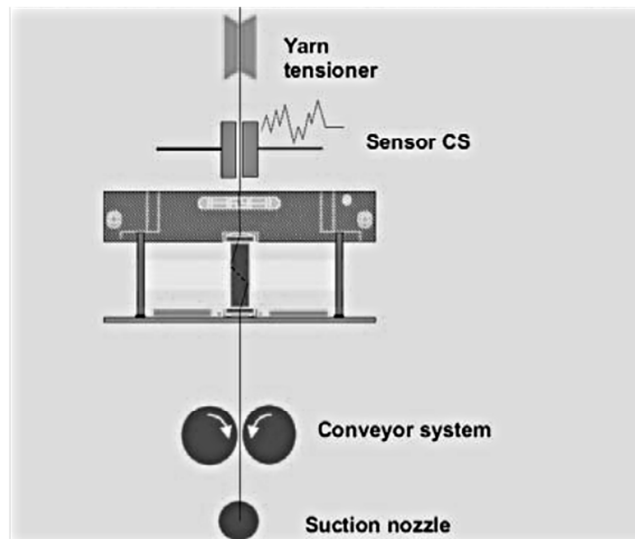


Figure 1-30 Schéma de fonctionnement de l'USTER TESTER 5-C800 [56]

Cette technique est rarement utilisée sur les mèches de carbone. En effet, même si la fibre de carbone est moins conductrice que les matériaux métalliques, elle l'est cependant suffisamment pour atteindre la tension de claquage du condensateur, provoquant ainsi sa destruction.

III. 3) Echelle macroscopique

III. 3. a) Enduction électro-sensible

Afin de déterminer les efforts subis par les mèches au cours des procédés de transformation textile, des fils capteurs peuvent être utilisés.

Ils permettent d'enregistrer les contraintes mécaniques en temps réel subies par le fil, in situ, de manière statique ou dynamique. Une des applications de cette méthode est l'identification des zones où le fil peut être endommagé [57].

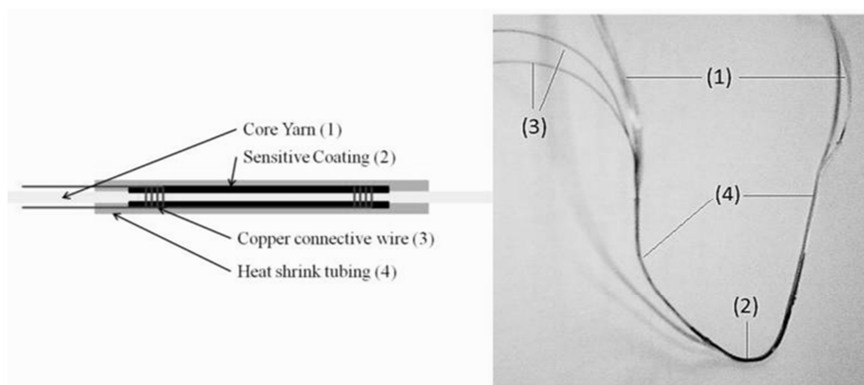


Figure 1-31 Fils capteurs [58]

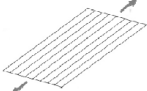
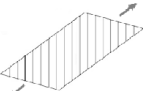
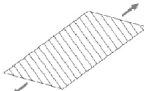
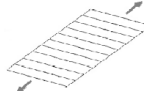
III. 3. b) Emission acoustique

Aujourd'hui, l'émission acoustique est une méthode largement utilisée dans l'industrie pour la détection de défauts sur pièces finies (préformes injectées).

Elle est également utilisée pour suivre l'endommagement en temps réel d'un matériau composite sous sollicitation. En effet, les mécanismes d'endommagement sont accompagnés d'ondes acoustiques qui correspondent à une libération d'énergie.

Dans la bibliographie, plusieurs travaux ont été menés, visant à établir une corrélation entre plusieurs indicateurs de signaux, et le mode d'endommagement associé.

Par exemple, F. Philip *et al.* ont étudié quatre types de stratifiés (figure 1-32) sous sollicitation afin d'aboutir à une cartographie du type d'endommagement selon le temps de montée et l'amplitude du signal mesuré.

Empilement	$[0^\circ]$	$[\pm 45^\circ]_s$	$[\pm 67,5^\circ]_s$	$[90^\circ]_s$
Schématisation				
Sollicitation principale	fibres	interfaces entre plis en cisaillement	matrice interfaces fibres/matrice	interfaces fibres/matrice matrice
Contrainte à rupture	2000 MPa	200 MPa	50 MPa	35 MPa

(a)

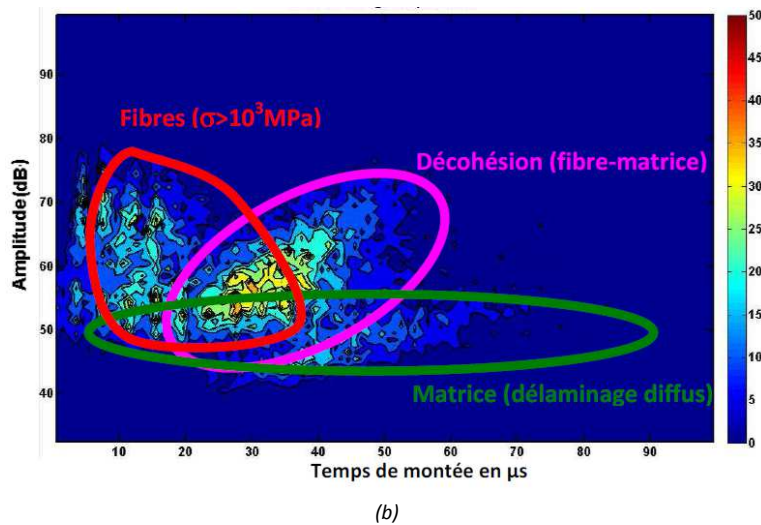


Figure 1-32 (a) Type d'éprouvettes testées

(b) Densité de signaux de tous les essais réalisés dans le plan des descripteurs (temps de montée, amplitude) [59]

III. 3. c) Méthode optique par projection

Dans son étude des matériaux fibreux souples, Bueno *et al.* [60] proposent une méthode pour caractériser les fibres émergeant de la surface par l'utilisation de lumière rasante.

Un éclairage tangentiel par un faisceau laser permet d'obtenir l'ombre du relief de la structure sur un écran, et par conséquent la pilosité (poils et structure en noir sur fond blanc saturé).

Un filtre spatial optique permet alors de supprimer la composante continue (structure linéaire). Puis un logiciel de traitement d'images permet de supprimer le bruit et de quantifier la densité ainsi que la longueur des poils émergents de la structure.

Ce dispositif est schématisé sur la figure 1-33.

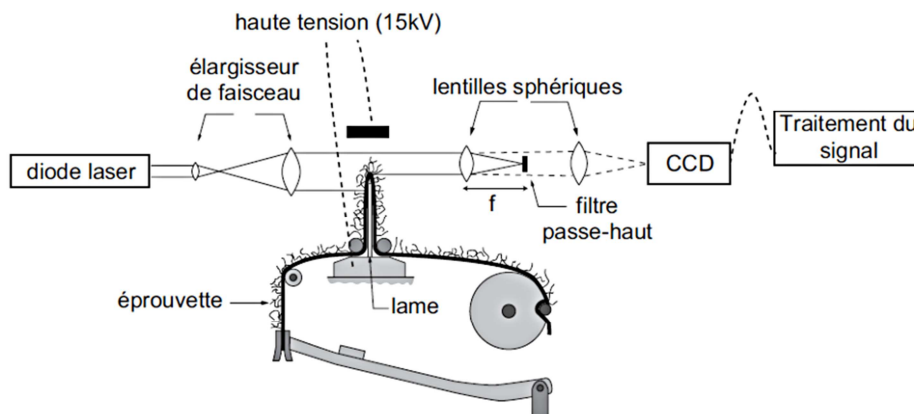
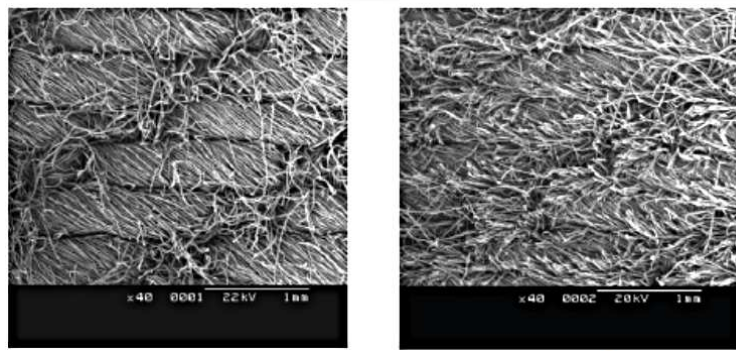
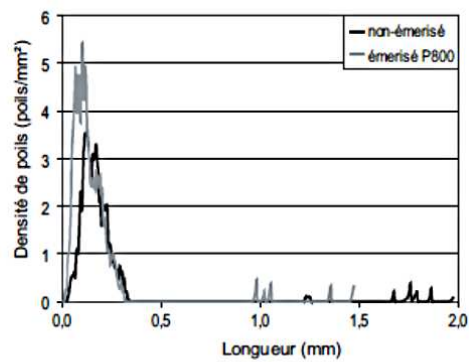


Figure 1-33 Dispositif de détermination de la pilosité développé par Bueno [60]

Cette méthode a été appliquée pour tester la distribution et la longueur des poils de sergés de coton émerisés ou non (voir figure 1-34).



Sergé de coton non-émerisé (à gauche) et émerisé avec un grain P800 (à droite).



Distribution en longueur réelle des poils avant (en noir) et après (en gris) émerisage.

Figure 1-34 Résultats du profilo-pilosimètre de Bueno et al. [60]

Conclusions du chapitre I

Dans ce chapitre, le procédé de fabrication de la fibre de carbone ex-PAN a été détaillé. En effet, les différentes étapes et les différents paramètres de ce procédé de fabrication permettent d'expliquer la morphologie de la fibre. Les propriétés mécaniques de la fibre sont directement liées à sa forte anisotropie.

Ces propriétés sont à l'origine des propriétés de la mèche qui en est constituée. D'autres éléments influents sur les propriétés de la mèche, comme le titre ou l'ensimage.

Dans le cadre de la fabrication des matériaux composites, la fibre de carbone est généralement utilisée comme renfort. L'architecture de ce renfort varie suivant l'application à laquelle il est destiné. Le choix de l'orientation des fibres a un impact direct sur les propriétés du matériau composites qui en sera constitué.

Le choix qui a été fait ici est de présenter les différentes structures textiles utilisées comme préformes pour les matériaux composites en fonction de leur dimensionnalité.

La bibliographie a montré que le passage de l'échelle de la mèche à l'échelle de la préforme engendrait des phénomènes de dégradation de la fibre de carbone.

Ces phénomènes de dégradation ont été listés en fonction de leur échelle caractéristique d'étude. Puis, les différentes méthodes associées pour les prédire, ou les caractériser, ont été présentées.

Dans le chapitre suivant, le procédé de tissage sera plus particulièrement étudié. Notamment, les paramètres procédé pouvant mener à l'endommagement de la mèche de carbone vont être détaillés.

Chapitre II – Risques d'endommagement au cours des procédés

Dans le chapitre précédent, la littérature a montré que les procédés de transformation textile peuvent être à l'origine d'une détérioration de la mèche de carbone et donc d'une perte des propriétés attendues de la préforme.

Ce chapitre est consacré à l'identification des paramètres procédés supposés responsables de cette dégradation.

Dans une première partie, une analyse santé-matière est réalisée sur les modes de défaillance, leurs effets et leur criticité. Cette analyse, menée sur le procédé de tissage, permet d'identifier les différents éléments susceptibles de fragiliser la mèche de carbone lors de sa structuration en tissu, au cours des différentes étapes de la transformation textile. Dans un deuxième temps, un état de l'art associé à une étude cinématique va préciser les valeurs des paramètres procédés couramment utilisées dans l'industrie. Enfin, la troisième et dernière partie présente la mise en place d'un plan d'expériences pour consolider cette analyse tout en réduisant le nombre d'essais.

PLAN DU CHAPITRE

I)	ANALYSE DES MODES DE DEFAILLANCES, DE LEURS EFFETS ET DE LEUR CRITICITE ORIENTEE SANTE-MATIERE.....	67
I. 1)	Présentation	67
I. 2)	Description de la gamme opératoire du procédé de tissage	68
I. 3)	Détermination de la fréquence, probabilité et criticité des modes de défaillance.....	74
I. 4)	Analyse des résultats.....	75
II)	ETUDE CINEMATIQUE.....	77
II. 1)	Détermination de l’espace expérimental.....	78
II. 2)	Cadres et peigne.....	81
II. 3)	Cinématique du fil de chaîne.....	85
II. 4)	Œillets.....	86
II. 5)	Matière.....	88
III)	PLAN D’EXPERIENCE.....	89
III. 1)	Présentation	90
III. 2)	Choix du plan d’expérience	90
III. 3)	Facteurs et niveaux	91
III. 4)	Résolution du plan d’expérience.....	94
	CONCLUSIONS DU CHAPITRE II.....	98

I) Analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité orientée santé-matière

I. 1) Présentation

Communément appelé « AMDEC », l'analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité est une méthode d'optimisation des procédés et de réduction des temps d'arrêts [61].

Cette méthode consiste à identifier les différentes étapes d'un processus, à lister les défaillances possibles, puis à chiffrer leur criticité ainsi que leur probabilité d'apparition. Cette analyse permet de mettre en évidence les étapes les plus risquées et de mettre en place des solutions amont pour réduire ces risques [62].

La méthodologie utilisée est la suivante :

- Lister les étapes principales et secondaires du procédé
- Détailler les fonctions qui jalonnent ces étapes
- Déterminer les modes de défaillances de la fonction
- Examiner les effets de ces modes de défaillances sur les différents niveaux
- Enumérer les causes possibles du défaut
- Déterminer sur une échelle de 1 à 10 :
 - la gravité G de l'effet de la défaillance
 - la fréquence F d'apparition probable du mode de défaillance
 - la probabilité de non-détection D du mode de défaillance
- Calculer l'indice de criticité $C = G \times F \times D$
 - Si $C \leq 100$, on considère que le risque est maîtrisé.
 - Si $C > 100$, alors le risque est non maîtrisé.
- Eventuellement, modifier la conception ou mettre en place des modes de contrôle

La définition des critères retenus pour déterminer G, F et D est donnée au paragraphe I.3.

Cette méthode, principalement utilisée dans l'industrie, pour inventorier les risques de défaillance liés à un processus industriel, est ici appliquée aux risques de défaillance, au sens de l'endommagement d'une mèche tout au long de l'opération de tissage. Comme le décrit la méthodologie citée ci-dessus, la première étape de ce travail consiste à lister les étapes du tissage et d'identifier les modes de défaillances qui peuvent apparaître.

I. 2) Description de la gamme opératoire du procédé de tissage

Le domaine d'étude retenu va de la réception des bobines de mèche de carbone au conditionnement du tissu (voir figure 2-1).

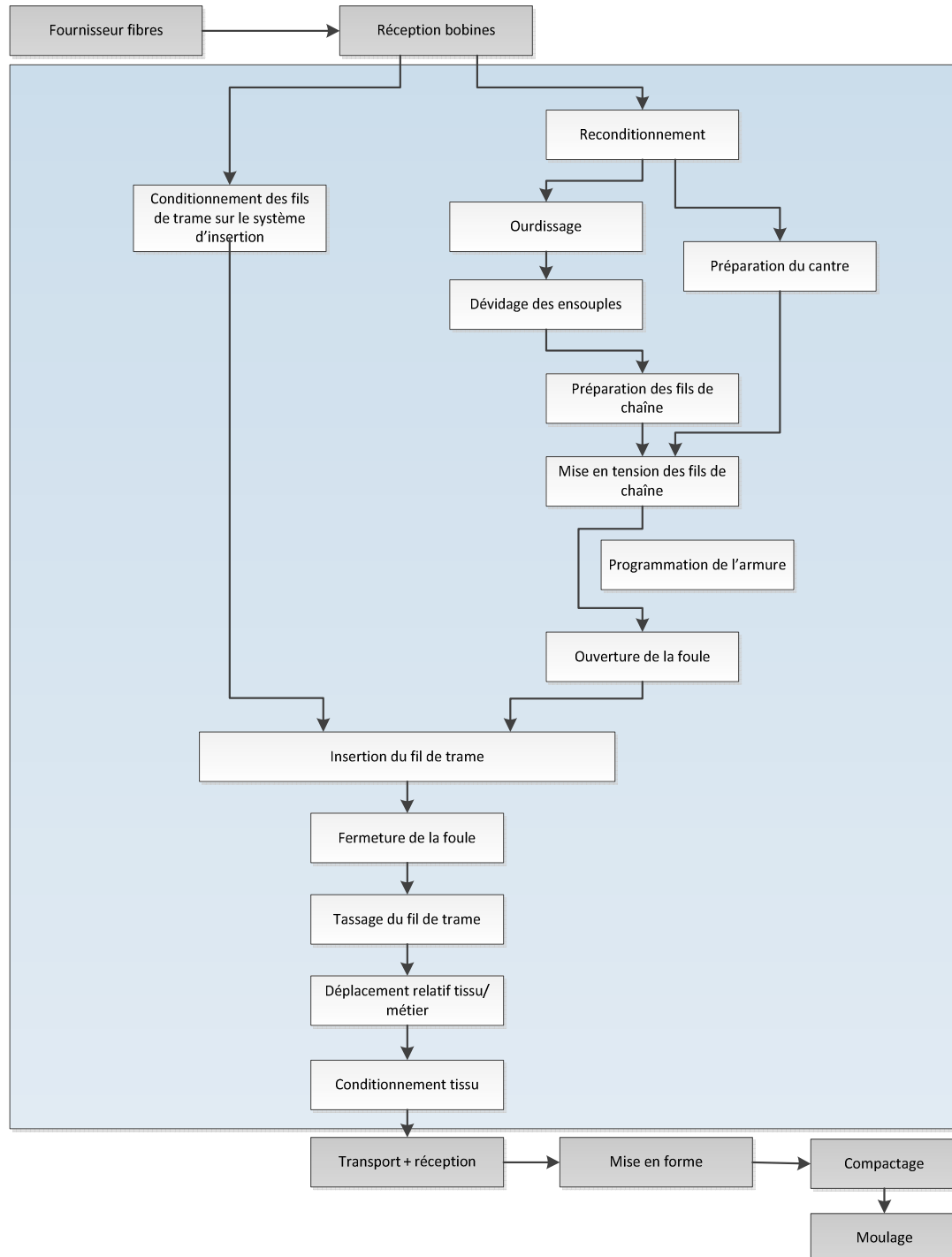


Figure 2-1 Domaine de définition de l'étude

Une fois les étapes principales listées, elles sont détaillées afin de faire ressortir les modes de défaillance potentiels pouvant survenir. La liste exhaustive des modes de défaillance associés à

chaque étape est donnée en annexe 1. Dans ce chapitre, seuls les modes de défaillance dont les effets ont un impact potentiels sur la santé-matière des mèches de carbone sont mentionnés.

Réception bobines : A cette étape, l’opérateur récupère les mèches de carbone conditionnées sur des bobines fournisseurs. Ces bobines sont standardisées. Le conditionnement standard pour une bobine de 12K est de 3,6kg de mèches de carbone par bobine, ce qui représente une longueur de 4540 m de matière. Nous avons vu au chapitre précédent que la mèche de carbone était ensimée afin de faciliter sa manipulation. Suivant le type d’ensimage utilisé, les fabricants préconisent une date limite d’utilisation, afin de garantir les meilleures propriétés pour l’ensimage. Ce délai s’apparente à une date de péremption de l’ensimage (notons tout de même que certains ensimages sont présentés comme « impérissables »). Un des modes de défaillance possible est alors le mauvais conditionnement (température, hygrométrie) des bobines ou alors le dépassement de la date de péremption de l’ensimage. Dans ces deux cas, l’ensimage n’est alors plus optimal et la mèche peut alors devenir difficile à travailler (manque de souplesse, mauvaise cohésion de la mèche).

Reconditionnement : A cette étape, la mèche de carbone est encore conditionnée sous forme de bobines de quelques kilos. Suivant le mode d’alimentation choisi – sur cantre ou sur ensouple – les mèches doivent être reconditionnées. Dans le premier cas, les bobines fournisseurs sont souvent trop encombrantes pour être utilisées directement sur un cantre, support de plusieurs centaines de bobines. Et dans le second cas, les mèches de carbone doivent être transférées sur une ensouple, support de plusieurs mèches de carbone, disposées cote à cote. Ce reconditionnement implique un débobinage (depuis la bobine fournisseur) puis un rembobinage (sur les bobines de cantre ou sur l’ensouple). Au cours de ces deux opérations, plusieurs modes de défaillance peuvent avoir un impact sur la santé-matière. Tout d’abord, l’angle de débobinage / bobinage peut être trop important, entraînant des frottements importants entre la mèche et les organes des machines, responsables d’une dégradation de la mèche de carbone. Une tension trop élevée de la mèche de carbone peut également avoir des effets similaires. A l’inverse, si la tension du fil est trop faible, la bobine produite risque d’être de mauvaise qualité, et être difficile à dévider, entraînant une détérioration de la mèche de carbone.

Préparation du cantre : Cette étape consiste à placer les bobines reconditionnées sur le cantre et à guider les mèches jusqu’à la sortie du cantre. Pour ce faire, les mèches passent à travers un certain nombre de « guides-fils ». Ces œillets ont pour but de canaliser, et comme leur nom l’indique, de guider la mèche.

Ourdissage : Cette opération permet de disposer parallèlement les fils de chaîne entre eux sur une ensouple. Deux méthodes sont alors possibles : l’ourdissage direct ou l’ourdissage sectionnel. Dans le cas de l’ourdissage direct, comme schématisé sur la figure 2-2, les mèches sont directement transférées d’un cantre à l’ensouple en passant par un peigne miseur qui permet de bien les séparer et les paralléliser.

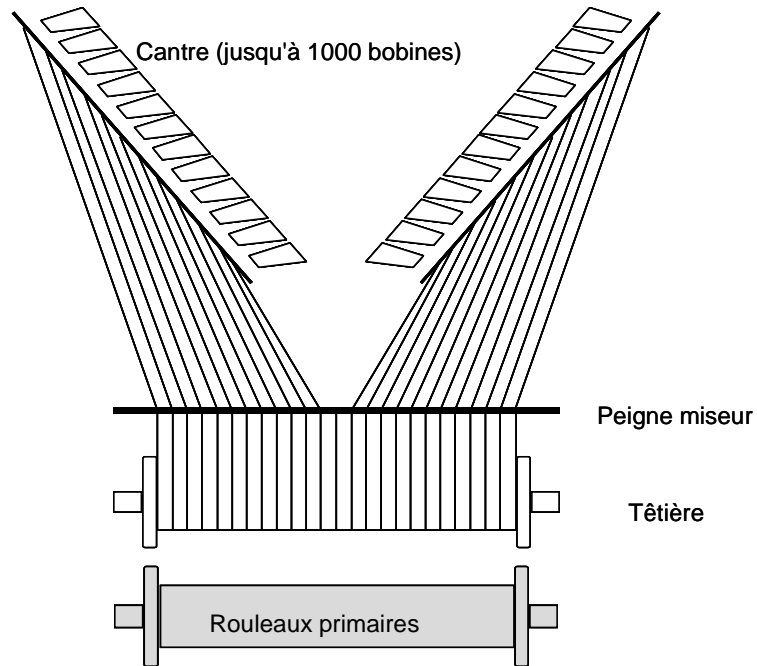


Figure 2-2 Principe de l'ourdissage direct [63]

Dans le cas de l’ourdissage sectionnel, comme schématisé dans la figure 2-3, les mèches sont d’abord transférées du cantre au tambour d’un ourdissoir, pour former des sections, puis du tambour de l’ourdissoir à l’ensouple. Cette technique permet d’obtenir une ensouple constituée de plusieurs sections différentes de fils de chaîne.

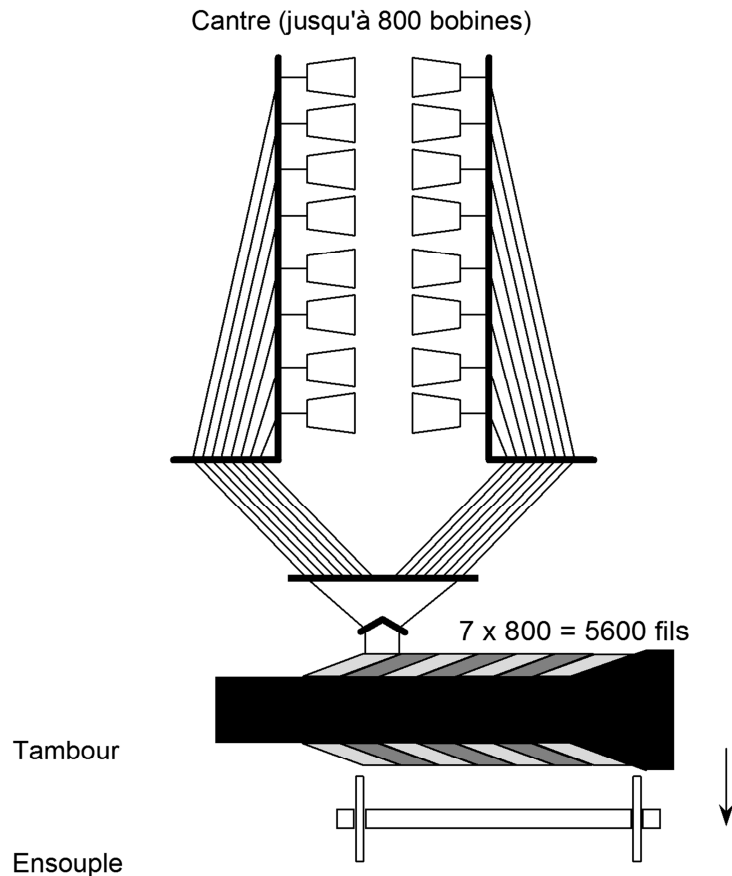


Figure 2-3 Principe de l'ourdissage sectionnel [63]

Au cours de cette étape, une mauvaise maîtrise du parallélisme des fils, ou un manque de tension peut entraîner des défauts de l'ensouple. Ces défauts correspondent principalement à une mauvaise superposition des nappes de fils de chaîne, un fil de chaîne de la nappe supérieure s'enfonçant dans la nappe inférieure. Ces défauts peuvent entraîner une casse des fils lors du dévidage des ensouples (étape suivante). A l'inverse, une tension excessive lors de l'opération d'ourdissage peut générer des frottements importants avec les nombreux éléments de guidage, entraînant une dégradation de la matière.

Dévidage des ensouples : Comme vu à l'étape précédente, un fil pénétrant à l'intérieur de l'ensouple peut entraîner des casses de fils. Sans aller jusqu'à la casse, le fil rentré à l'intérieur de l'ensouple engendrera une dégradation des fils environnants lorsqu'il sera mis sous tension. D'autre part, un mauvais ourdissage peut entraîner lors du dévidage des irrégularités de tension entre les fils de chaîne, qui peuvent avoir, comme nous le verrons ultérieurement, des conséquences graves lors de l'insertion du fil de trame.

Préparation des fils de chaîne (et piquage) : Cette étape consiste à disposer les fils de chaîne dans leur lice respective, comme représenté en figure 2-4 (rentrage) puis entre les dents du peigne (piquage).

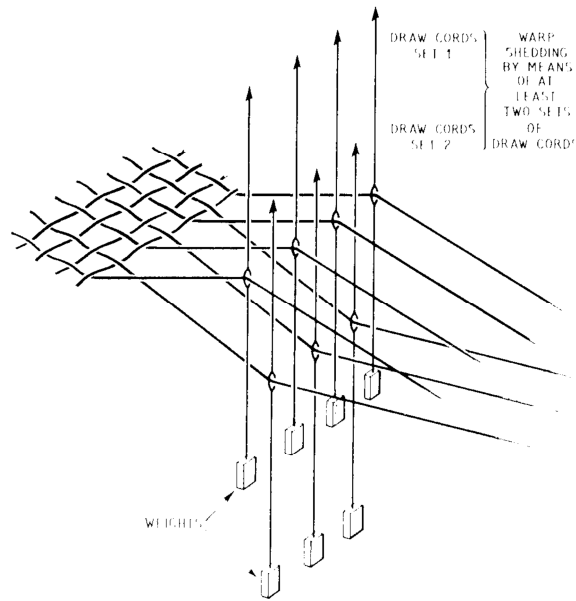


Figure 2-4 Fils insérés dans leur lice [64]

Dans le cas du tissage à cadres, il existe différents types de rentrages (« suivi », « à pointe et retour », « sauté », « amalgamé »,...), représentés en figure 2-5 et décrivant les façons de répartir les fils dans les cadres.

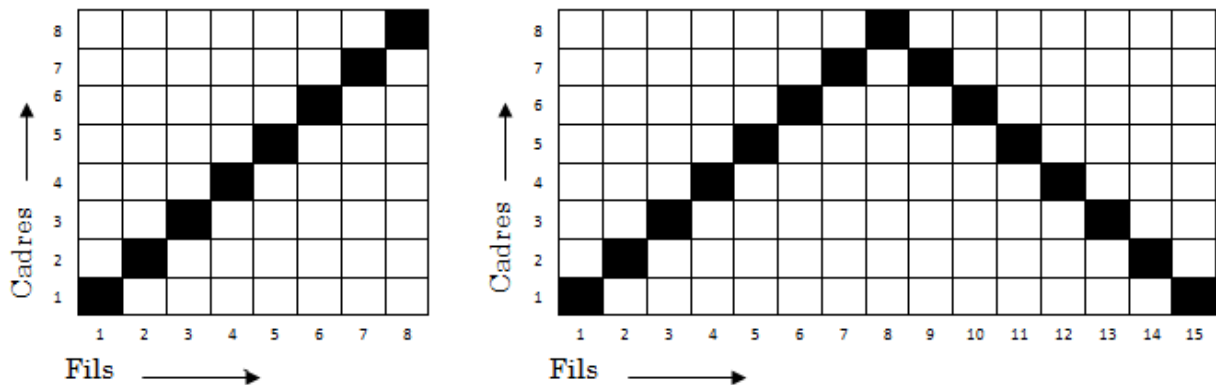


Figure 2-5 Principe du rentrage "suivi" et du rentrage "à pointe et retour"

Cette répartition a une influence sur l’armure obtenue. Plusieurs erreurs peuvent survenir à cette étape très longue et fastidieuse. Le fil de chaîne peut être inséré dans la mauvaise lice (deux fils de chaîne intervertis), ou alors plusieurs fils de chaîne peuvent être insérés dans la même lice. Ces erreurs peuvent devenir graves lors de l’insertion du fil de trame, comme nous le verrons par la suite.

Le piquage consiste à insérer les fils de chaîne dans les broches du peigne. Cette répartition dépend de l’armure tissée. En effet, les fils de chaîne travaillant ensemble seront insérés dans la même broche pour minimiser les frottements entre fils lors de l’ouverture de la foule. La densité de dents par cm du peigne est appelée calibre du peigne. Un peigne peut avoir jusqu’à 6 dents par cm. Le nombre de fils par broche dépend directement de la densité de fils de chaîne par cm. Cette densité joue un rôle important dans la dégradation des fils de chaîne. En effet, plus le

nombre de fils de chaîne par broche est important, plus nous constatons des frottements entre les fils.

Mise en tension des fils de chaîne : Une fois les fils disposés dans les lices et dans le peigne, ils sont mis sous tension selon une opération délicate. En effet, cette tension est indispensable pour tisser dans de bonnes conditions. Une tension insuffisante ne permet pas d'ouvrir correctement la foule (les fils de chaîne ne montent pas), et une tension trop importante détériore les fils.

Ouverture de la foule : L'ouverture de la foule correspond à la montée/descente des cadres, permettant ainsi de sélectionner les fils de chaînes « pris » (c'est-à-dire que le fil de chaîne passe au dessus du fil de trame) ou « laissés » (en dessous). Ainsi les fils de chaîne portés par les cadres montant seront pris, et ceux qui descendent laissés. Au cours de cette étape, plusieurs défauts peuvent survenir. Un ou plusieurs cadres peuvent ne pas monter (à cause d'un problème mécanique). Au sein d'un cadre montant, un ou plusieurs fils peuvent ne pas monter à cause d'un manque de tension. Enfin, les fils de chaîne peuvent subir des frottements avec les lices environnantes. Dans les deux premiers cas, la foule n'est pas dégagée, c'est-à-dire qu'un ou plusieurs fils de chaîne font obstacle au passage de la trame.

Insertion du fil de trame : Dans le cas cité précédemment, à savoir que la foule n'est pas dégagée, l'insertion du fil de trame, quel que soit son système (par navette, lance, projectiles, jet d'air ...) va entraîner la casse des fils de chaîne qui feront obstacle. Cet événement est appelé une « rafle ».

Fermeture de la foule : Une fois le fil de trame inséré, la foule est refermée, c'est-à-dire que les cadres montés redescendent à leur position initiale, afin de permettre le tassage du fil de trame par le peigne. Lors de cette opération, il peut arriver qu'un ou plusieurs cadres, ou un ou plusieurs fils, ne redescendent pas. Ils subissent alors un frottement excessif avec le peigne lors du tassage, entraînant leur détérioration.

Tassage du fil de trame : Cette opération permet, comme son nom l'indique, de tasser le fil de trame nouvellement inséré dans le tissu. Il s'agit d'une opération fortement traumatisante pour les fils de chaîne et de trame. En effet, si la densité de fils de chaîne par broche est trop importante, les frottements entre les fils avec les dents du peigne seront nombreux. Si la pression de tassage est trop forte, on risque également de dégrader le fil de trame. A l'inverse, si la pression est trop faible, ou bien s'il y a des défauts dans le piquage (schéma d'insertion des fils de chaîne dans le peigne), c'est-à-dire si certains fils de chaîne se croisent, le peigne risque alors de ne pas atteindre le point de tassage, et par conséquent des défauts d'irrégularité sur la densité en trame risquent d'apparaître dans le tissu.

I. 3) Détermination de la fréquence, probabilité et criticité des modes de défaillance

Les différentes opérations principales étant listées et détaillées, une probabilité de non-détection D, une fréquence d'apparition ou occurrence O et une criticité ou gravité G doivent être attribuées à chaque mode de défaillance identifié.

Le barème utilisé est donné en tables 2-1, 2-2 et 2-3.

L'attribution de ces notes revêt un caractère subjectif, basé sur l'expérience.

Critères	Notes D
Très faible probabilité de ne pas détecter la dégradation santé-matière ou de laisser passer la dégradation santé-matière avant que le fil ne quitte l'opération concernée.	1 ou 2
Ex : surveillance automatique et permanente de la santé-matière des fils	
Faible probabilité de ne pas détecter la dégradation santé-matière ou de laisser passer la dégradation santé-matière avant que le fil ne quitte l'opération concernée.	3 ou 4
Ex : la dégradation santé-matière est évidente, quelques défauts échapperont à la détection (contrôle unitaire par exemple)	
Probabilité modérée de ne pas détecter la dégradation santé-matière ou de laisser passer le défaut avant que le produit ne quitte l'opération concernée.	5 ou 6
Ex : contrôle visuel difficile	
Probabilité élevée de ne pas détecter la dégradation santé-matière ou de laisser passer le défaut avant que le produit ne quitte l'opération concernée.	7 ou 8
Ex : le contrôle est subjectif	
Probabilité très élevée de ne pas détecter la dégradation santé-matière ou de laisser passer le défaut avant que le produit ne quitte l'opération concernée.	9 ou 10
Ex : le point n'est pas contrôlé ou contrôlable. Le défaut et ses causes ne sont pas décelables.	

Table 2-1 Barème utilisé pour la probabilité de non détection

Critères	Notes O
Probabilité très faible	1 ou 2
Défaut inexistant sur processus analogue.	
Probabilité faible	3 ou 4
Très peu de défauts sur processus analogue.	
Probabilité modérée	5 ou 6
Défauts apparus occasionnellement sur des processus analogues.	
Probabilité élevée	7 ou 8
Défauts fréquents sur processus analogue.	
Probabilité très élevée	9 ou 10
Il est certain que le défaut se produira fréquemment.	

Table 2-2 Barème utilisé pour la probabilité d'occurrence

Critères client final	Notes G
Effet minime. La préforme n'est pas impactée.	1
Effet mineur que l'on peut deviner sur la préforme, mais ne provoquant qu'une pilosité mineure et aucune dégradation notable des performances de l'ensemble.	2 ou 3
Effet avec signe avant-coureur qui impacte la préforme.	4 ou 5
Effet sans signe avant-coureur (ou avec signe avant-coureur et sans solution) qui impacte la préforme. Perturbation modérée du flux de production. Peut provoquer quelques rebuts ou retouches sur le produit. Les frais de réparation sont modérés.	6 ou 7
Effet avec signe avant-coureur qui provoque une importante perturbation du flux. Rebut ou retouches importantes sur la préforme. Frais de remise en état du processus élevés.	8
Effet sans signe avant-coureur qui provoque une importante perturbation du flux. Rebut ou retouches importantes sur la préforme. Frais de remise en état du processus élevés.	9
Effet impliquant des problèmes de sécurité pour les opérateurs ou de non-conformité de la préforme aux règlements en vigueur.	10

Table 2-3 Barème utilisé pour la gravité

En fonction de ce barème, nous pouvons alors calculer la criticité prévisionnelle C de chaque mode de défaillance et proposer des actions préventives, sous forme de plan de mitigation.

I. 4) Analyse des résultats

L'AMDEC obtenue grâce à l'analyse fonctionnelle présentée au paragraphe I.2 est disponible en annexe 1. Dans celle-ci, nous constatons que les principales sources de dégradation sévère peuvent être catégorisées en plusieurs familles :

- les paramètres « environnementaux », tels que la température et l'hygrométrie
Comme nous l'avons vu au paragraphe précédent, ils peuvent jouer un rôle à l'étape « réception des bobines ». En effet, si le carbone ne réagit pas à température ambiante à ces facteurs, l'ensimage y est sensible. Rappelons que l'ensimage est un agent chimique qui permet de faciliter la manipulation de la mèche, en améliorant sa cohésion.
- les paramètres « procédés ». En effet, nous avons vu que la tension des fils de chaîne, ainsi que la vitesse des métiers étaient largement responsables, à plusieurs étapes du tissage, d'une augmentation du risque de détérioration de la matière. D'autres éléments, comme le mode d'ourdissage (cantre, ourdissage direct ou ourdissage sectionnel) ont également un impact, puisqu'ils impliquent un nombre de manipulations croissant de la mèche de carbone.
- les paramètres « pièces du métier », comme la forme, la taille et le matériau, des guides-fils, lices et dents du peigne ont également été mis en lumière par l'AMDEC.
- les paramètres « matière ». En effet, en fonction de la nature de la fibre (titre, précurseur, caractéristiques mécaniques), mais aussi de son ensimage (quantité, nature, âge), nous pouvons supposer une modification du frottement.

En conclusion de ce paragraphe, nous pouvons préciser que l'AMDEC a permis de souligner, directement ou indirectement, quatre familles de paramètres influents sur la dégradation de la mèche de carbone au cours du tissage : i) les paramètres environnementaux, ii) procédés, iii)

pièces du métier, et iv) matière (titre, ensimage). Ceci est résumé en figure 2-6 par un diagramme Ishikawa, aussi appelé diagramme 5M, qui liste les paramètres influents sur l’endommagement de la mèche de carbone « Milieu, Méthode, Main d’œuvre, Matière, Machine ».

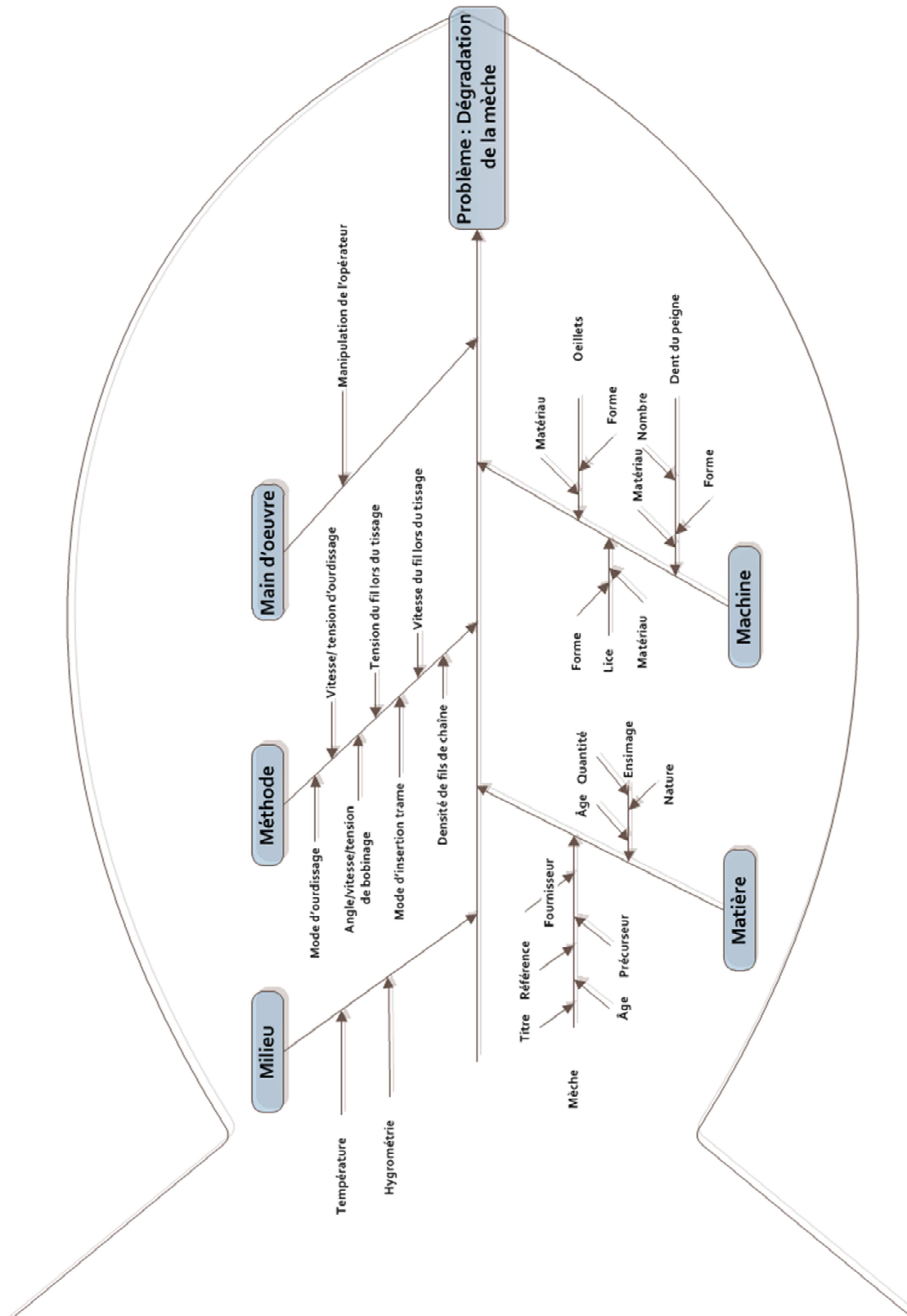


Figure 2-6 Diagramme ISHIKAWA récapitulatif des familles de paramètres influents sur la santé matière de la mèche de carbone

II) Etude cinématique

Dans le paragraphe précédent, quatre familles de paramètres influents sur la santé matière de la mèche de carbone au cours du tissage ont été identifiées. Ces différents paramètres sont reproduits dans un banc de test, puis la dégradation engendrée est caractérisée mécaniquement ainsi que morphologiquement (cf. chapitre III).

L'objectif de cette partie est de préciser le champ des expériences à réaliser, afin de pouvoir quantifier l'influence des différents paramètres jugés influents.

II. 1) Détermination de l'espace expérimental⁷

II. 1. a) Vitesse de production

Le premier choix à faire concerne le type de métier étudié. En effet, les métiers à tisser sur lesquels sont travaillées des matières traditionnelles, comme le coton ou la laine, peuvent fonctionner jusqu'à 2012 coups/minute⁸. Pour les métiers sur lesquels sont travaillées des fibres techniques, telles que le carbone, le verre ou l'aramide, les vitesses de production sont généralement moins élevées, pour tenir compte de la fragilité de la matière.

Cette information est capitale, puisque elle conditionnera la vitesse de montée/descente des lices, ou encore la vitesse de tassage du peigne.

Le choix qui est fait ici pour restreindre le domaine d'étude consiste à étudier un métier à tisser dont la production est un tissu carbone 2D avec mèches de carbone 12K.

Il est très difficile, voire impossible, d'obtenir des données précises concernant les vitesses de production qui sont appliquées par les fabricants de tissus carbone, en raison des secrets de fabrication. Néanmoins, il semblerait que les vitesses de fabrication courantes pour les tissus carbone 2D soient comprises entre 160 et 300 coups/min. Ce chiffre varie en fonction de l'armure (plus ou moins complexe) mais aussi en fonction du titre de la mèche tissée : plutôt 200 coups/min pour une mèche 12K contre 300 coups/min pour une mèche 3K. Actuellement les tendances vont vers une augmentation des vitesses de production jusqu'à 350 coups/min.

Dans ces conditions, nous retenons une valeur de vitesse de production de 200 coups/min, ce qui correspond à une valeur moyenne pour du tissage 2D sur mèche de carbone 12K.

II. 1. b) Nombre d'étapes

La seconde inconnue concerne le nombre d'étapes du cycle de tissage. Ce dernier regroupe chronologiquement les actions suivantes :

- Montée cadre (= ouverture foule),

⁷ Voir définition au paragraphe III. 3)

⁸ Le nombre de coups par minute représente le nombre d'insertions trame par minute et constitue un indicateur de la vitesse de production d'un métier à tisser.

- Insertion trame,
- Descente cadre (= fermeture foule),
- Aller peigne (= tassage),
- Retour peigne.

Suivant les technologies, le mouvement d’aller-retour des cadres et du peigne peut être simultané ou décalé.

II. 1. c) Mode d’insertion de la trame

Il existe plusieurs modes d’insertion de la trame :

- La navette : Le fil de trame est déroulé depuis une cannette (support du fil) située dans la navette qui effectue des allers-retours d'une lisière à l'autre.
- Les lances : Souples ou rigides, elles sont munies de pinces positives ou négatives qui saisissent l'extrémité libre de la trame; la lance d'entrée donne la trame à la lance de sortie au centre de la laize.
- Les projectiles : Il s’agit de masselottes munies d'un système de pincement de la trame. Chaque projectile, portant la trame, traverse la foule. Un métier est équipé d'une quinzaine de projectiles qui "tournent" en permanence les uns après les autres.
- Le jet d'air : Il s’agit d'air sous pression, injecté par une buse principale à l'entrée de la foule. Une série de buses relais disposées régulièrement le long de la laize véhicule la trame d'une lisière à l'autre. Un peigne de profil spécial canalise le trajet de la trame.
- Le jet d'eau : Comme pour le jet d'air, mais avec une seule buse principale et l'air étant remplacé par de l'eau.

Dans notre cas, le jet d’air et le jet d’eau sont des modes d’insertion exclus puisque non adaptés respectivement à une mèche non retordue (et donc sans cohésion suffisante pour être transportée par jet d’air) et ensimée (l’eau dilue l’ensimage et contribue donc à son retrait).

Les projectiles ne sont généralement pas utilisés pour le tissage du carbone en raison de leur trop grande vitesse.

Le principal mode d’insertion communément utilisé est l’insertion par lances. Il permet de travailler à vitesse modérée et sans contact avec la matière.

Une autre méthode, utilisée mais qui tend à disparaître est l’insertion par navette. Elle permet de conserver la continuité du fil de trame, mais a comme inconvénient d’être en contact avec les fils de chaîne (la navette roule sur la nappe non-travaillante).

Le choix qui est fait ici est de retenir l’utilisation de lances pour l’insertion de la trame.

II. 1. d) Laize

La laize représente la largeur de tissu. Elle peut varier de quelques centimètres (échantillonnage) à plusieurs centaines de centimètres.

Plus la laize est grande, plus la lance aura de distance à parcourir pour réaliser une insertion de trame.

Nous considérons une laize de tissu comprise entre 60,0 cm et 120,0 cm. Une valeur intermédiaire de 90,0 cm est ainsi retenue pour la suite du travail.

II. 1. e) Nombre, hauteur de montée et espacement des cadres

Le nombre de cadres d'un métier à tisser a une influence directe sur la complexité des armures qu'il est possible de réaliser. En effet, pour une toile (alternance de pris et de laissés, cf. chapitre I), deux cadres seulement sont suffisants. Le standard pour un métier à tisser est de 24 cadres. En effet, c'est un multiple de 2, 3 et 4, ce qui est avantageux pour la répétition des motifs élémentaires d'armure. Pour les armures de rapport de répétition 5, nous travaillons alors sur 20 cadres (4 cadres ne travaillant pas).

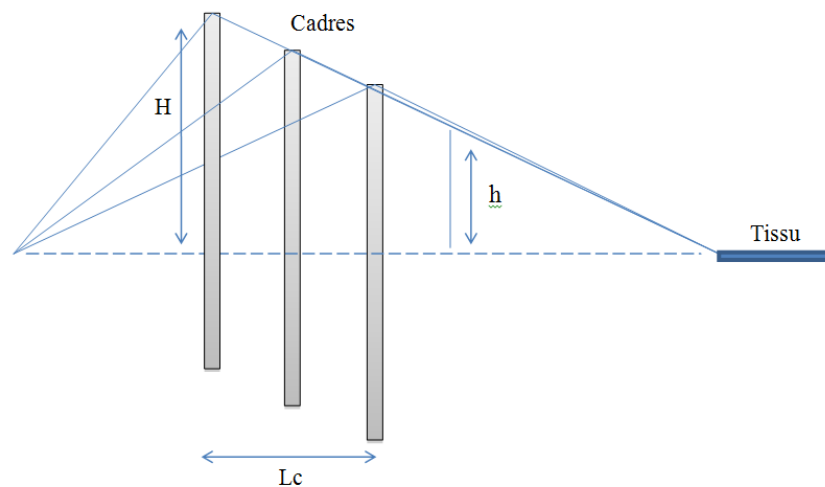


Figure 2-7 Hauteur de montée H , Longueur de cadres L_c , et hauteur de croisure h

Il existe également des métiers à 36 ou 48 cadres.

Or, plus il y a de cadres sur un métier à tisser, plus la distance L_c entre le premier cadre et le dernier cadre est importante, et plus le dernier cadre devra parcourir une distance H importante pour permettre l'ouverture d'une foule acceptable (voir figure 2-7). En effet, pour permettre l'insertion de la trame (par lances dans notre cas), la hauteur au point de croisure h doit être de 3,0cm au minimum [65].

Ici, le choix qui est fait est de considérer un métier à 48 cadres (valeur supérieure).

Les largeurs de cadre peuvent varier suivant les machines, de 0,3 à 1,8 cm [65]. La valeur qui est retenue ici est de 1,2 cm.

Enfin, il y a deux types de foules possibles : symétrique ou asymétrique. Dans le premier cas, quand les cadres « pris » montent, les laissés descendent, de façon à ce que tous les fils de chaîne subissent la même tension. Dans le deuxième cas, celui de la foule asymétrique, seuls les cadres « pris » montant, les cadres « laissés » restent immobiles. L'inconvénient étant que les fils pris plus fréquemment subissent davantage de tension que les fils laissés, et que les cadres « pris » doivent parcourir une plus grande distance pour permettre l'ouverture de la foule, comme le montre la figure 2-8.

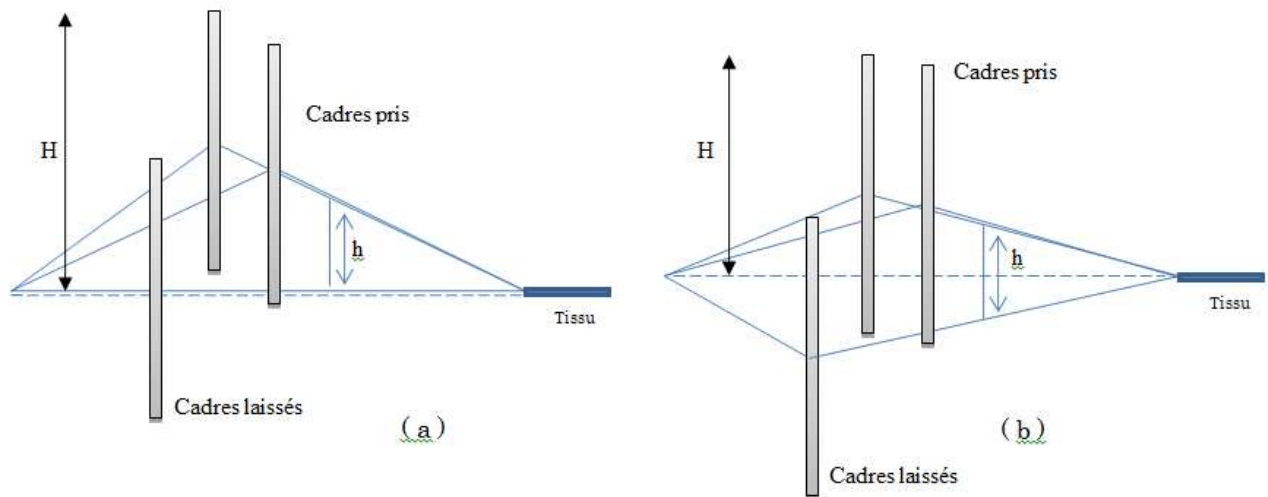


Figure 2-8 Ouverture de foule (a) asymétrique
(b) symétrique

II. 1. f) Récapitulatif

Les choix retenus pour définir le domaine d'étude sont :

- Métier à destination de tissus carbone 2D
- Production de 200 coups/min
- Insertion par lances
- 5 ou 6 étapes pour un cycle de tissage
- Laize de 90,0 cm
- Point de croisure de 3,0 cm minimum
- 48 cadres
- Largeur de cadres de 1,2 cm

II. 2) Cadres et peigne

II. 2. a) Durée d'un cycle

D'après les choix faits ci-dessus, il est désormais possible de déterminer les différentes valeurs associées aux paramètres identifiés comme potentiellement influents sur la dégradation de la mèche de carbone au cours du tissage.

La vitesse de production de 200 coups/min implique 3,3 coups/s, approximé à 3 coups/s. Cela signifie qu'en 1 seconde, trois cycles de tissage doivent être réalisés (voir figure 2-9).

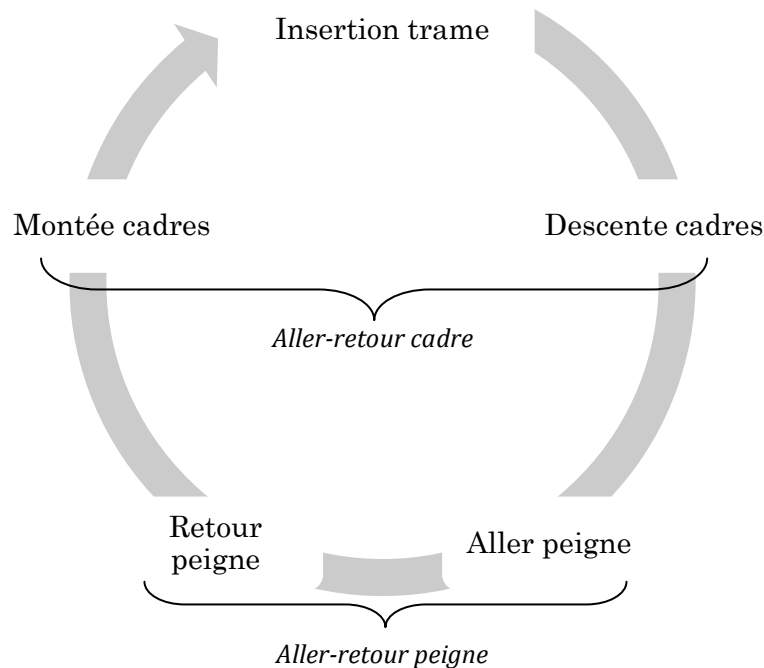


Figure 2-9 Cycle de tissage

La durée d’une insertion trame dépend de la technologie retenue. Ici, nous avons fait le choix d’une insertion par lance.

L’état de l’art montre que les vitesses actuelles pour l’insertion de la trame par lance sont comprises entre 500 et 1200 m/min [66] [67]. Pour une laize de 90,0 cm, cela représente une durée d’insertion comprise entre 0,045 s et 0,11 s.

En partant du cas de figure le plus pessimiste, il reste donc 0,22 s pour effectuer un aller-retour cadre et un aller-retour peigne.

II. 2. b) Vitesse des cadres

La vitesse de montée/descente des cadres dépend de la profondeur des cadres L_c , de la distance parcourue par le peigne L_p , ainsi que de la hauteur h d’insertion trame au point de croisure (voir figure 7).

En effet, plus la hauteur au point de croisure h est importante (grande foule), plus le dernier cadre devra monter pour assurer l’ouverture de la foule.

Dans le cas d’un métier à 48 cadres, l’épaisseur d’un cadre étant de 1,2 cm, la profondeur de cadre L_c est de 57,6 cm.

Sachant que la hauteur au point de croisure h doit être au minimum de 30 mm, nous avons la relation suivante (2.1):

$$H = h \left(L_c + \frac{1}{L_p} \right) \quad (2.1)$$

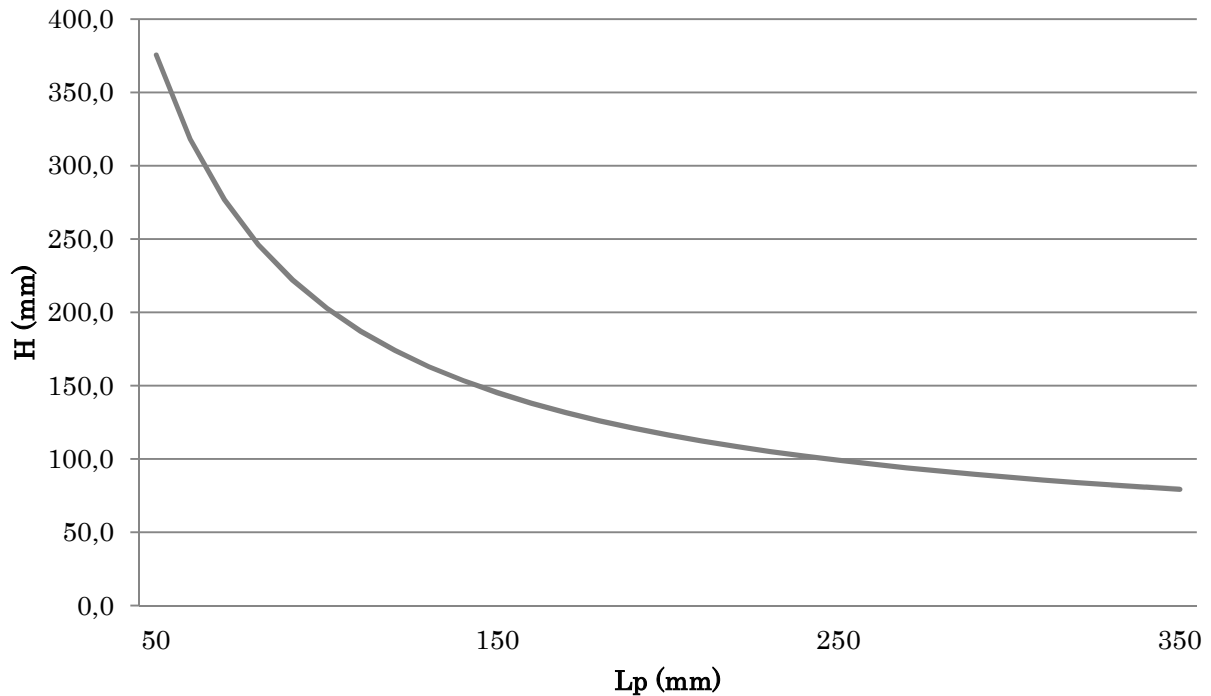


Figure 2-10 Hauteur de montée de cadre en fonction de la distance de tassage avec $L_c = 57,6$ cm et $h = 3,0$ cm

Comme le montrent la formule (2.1) et la figure 2-10, L_p et H évoluent en sens inverse. En effet, plus L_p augmente, plus H diminue, ce qui permet de réduire la vitesse des cadres. Or, lorsque L_p augmente, la distance de tassage devient plus importante, augmentant au passage la distance de frottement sur les fils de chaîne.

Sur les métiers industriels, la course de peigne est généralement de 10,0 cm, ce qui implique donc une hauteur de cadre maximale de 20,3 cm pour une foule asymétrique ou 101,5 cm pour foule symétrique (dans l'hypothèse où la foule est symétrique, la hauteur de cadre est à diviser par 2).

Autour de cette valeur moyenne, nous choisissons un intervalle de course pour le peigne de :

$$5,0 \text{ cm} \leq L_p \leq 30,0 \text{ cm} \quad (2.2)$$

Et pour les cadres :

$$1,0 \text{ cm} \leq H \leq 20,0 \text{ cm} \quad (2.3)$$

Les cadres et le peigne n'ont pas la même course. Nous pouvons donc déterminer leur vitesse :

- Soit de manière à ce qu'ils aient la même vitesse
- Soit de manière à ce que leur déplacement ait la même durée.

Précédemment, nous avons rappelé que le cadre et le peigne ont 0,22 s pour effectuer chacun un aller-retour.

Si le cadre et le peigne ont la même vitesse V_p et V_c , alors :

$$\left\{ \begin{array}{l} Vp = \frac{2 Lp}{(0,22-tp)} \\ Vc = \frac{2 H}{(0,22-tc)} \\ tp + tc = 0,18 \\ Vp = Vc \end{array} \right. \quad (2.4)$$

Avec tp le temps nécessaire pour un aller-retour du peigne et tc le temps nécessaire pour un aller-retour de cadre.

D’où,

$$tp = \frac{0,18}{\frac{Lp}{H} + 1} \quad (2.6)$$

Si le cadre et le peigne ont le même temps pour effectuer leur déplacement, alors ils ont chacun 0,11 s pour effectuer un aller-retour, ce qui implique pour leurs vitesses respectives les résultats donnés en table 2-4.

Nombre d'insertion trame par seconde	Temps restant pour les déplacements peigne et cadre (s)	H (mm)	Vitesse des cadres (mm/s)	Lp (mm)	Vitesse du peigne (mm/s)
3	0,22	10	90,91	50	227,27
		20	181,82	75	340,91
		30	272,73	100	454,55
		40	363,64	125	568,18
		50	454,55	150	681,82
		60	545,45	175	795,45
		70	636,36	200	909,09
		80	727,27	225	1022,73
		90	818,18	250	1136,36
		100	909,09	275	1250,00
		110	1000,00	300	1363,64
		120	1090,91		
		130	1181,82		
		140	1272,73		
		150	1363,64		
		160	1454,55		
		170	1545,45		
		180	1636,36		
		190	1727,27		
		200	1818,18		

Table 2-4 Scenarii de vitesse des cadres et du peigne en fonction de H(mm) et Lp(mm)

Sur la base de ces valeurs, la vitesse maximale pour le peigne est de 1363 mm.s^{-1} et celle pour un cadre est de 1818 mm.s^{-1} dans le cas d’une foule non symétrique et de 909 mm.s^{-1} dans le cas d’une foule symétrique.

$$3 \text{ trames / s} \quad \left\{ \begin{array}{l} V_p \text{ max} = 1363 \text{ mm.s}^{-1} \\ V_c \text{ max} = 1818 \text{ mm.s}^{-1} \text{ si foule non symétrique} \\ V_c \text{ max} = 909 \text{ mm.s}^{-1} \text{ si foule symétrique} \end{array} \right. \quad (2.7)$$

II. 3) Cinématique du fil de chaîne

II. 3. a) Vitesse

La vitesse de déplacement du fil de chaîne dépend du nombre d’insertions trame par seconde et du duitage⁹.

Plus le duitage est important, plus la vitesse de déplacement des fils de chaîne est lente : il faut insérer beaucoup de fils de trame pour produire du tissu, et c’est la vitesse de production du tissu qui conditionne l’avancée du tissu et donc l’avancée des fils de chaîne.

Des essais préparatoires menés sur 6 échantillons différents, avec diverses armures, ont montré que le duitage le plus important concernait le couche-à-couche « satin » à 5 couches, avec une densité chaîne de 8 fils/cm et une réduction trame de 55 fils par cm.

Cette donnée signifie qu’il faut insérer 55 fils de trame pour produire 1 cm de tissu.

Avec une insertion trame de 3 trames/s, 3,27 cm de tissu est produit en 1 minute. Il s’agit de la valeur minimum de la vitesse des fils de chaîne.

De même, dans le cadre de ces essais préparatoires, le duitage le moins important concernait le couche-à-couche « trame » 5 couches à 24 fils de chaîne/cm. La réduction trame pour ce tissu était de 12 fils de trame/cm.

Avec une insertion trame de 3 trames/s, cela signifie qu’il faut 4 s pour produire 1 cm de tissu. Par conséquent, 15 cm de tissu est produit en 1 minute. Il s’agit de la valeur maximale de la vitesse des fils de chaîne.

En résumé, en se basant sur une vitesse d’insertion de 3 trames/s et des duitages obtenus lors des essais préparatoires, nous obtenons :

$$0,545 \text{ mm.s}^{-1} \leq \text{vitesse fil chaîne} \leq 2,5 \text{ mm.s}^{-1} \quad (2.8)$$

⁹ Nombre de fils de trame par cm dans le tissu tombé de métier.

II. 3. b) Tension

La tension du fil de chaîne est un élément primordial. En effet, si la tension est trop faible, lorsque les cadres montent, les fils de chaîne sont trop lâches et la foule ne s'ouvre pas correctement (voir figure 2-11).

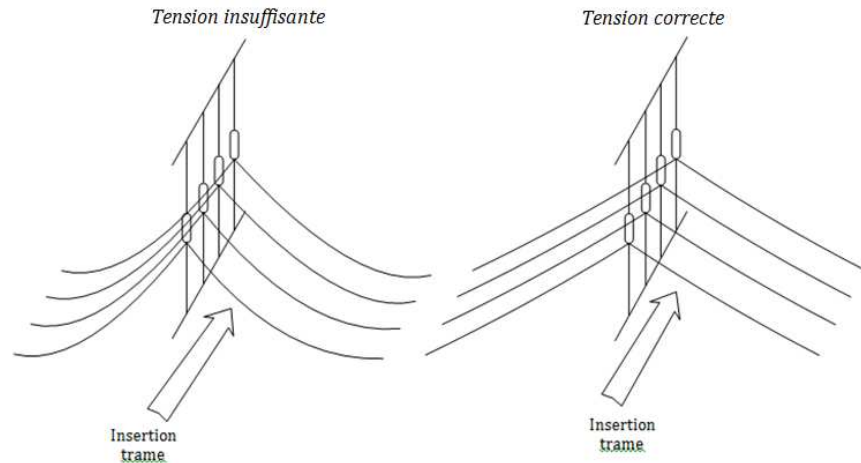


Figure 2-11 Différents cas de figure : faible tension et tension correcte des fils de chaîne

Si au contraire la tension est trop importante, les frottements entre les mèches de carbone et les différentes pièces de la machine augmentent et entraînent des détériorations de la matière.

Les valeurs de tension appliquées dans l'industrie concernant le tissage du carbone sont généralement de 200 cN environ. Afin de mettre en évidence les effets de ce paramètre, nous retiendrons comme valeurs d'essai, deux valeurs extrêmes de 100 cN et 400 cN.

II. 3. c) Nombre de cycles

Pour réguler la tension des fils de chaîne, des systèmes de rappel sont généralement employés : lorsque le fil est dévidé de sa bobine, un ressort permet de le contrôler afin de toujours assurer une tension constante.

De ce fait, le fil de chaîne est amené à effectuer de nombreux mouvements de va-et-vient à travers les différents éléments de guidage. Afin de mettre en évidence ce phénomène, nous testerons 1, 5, 10 et 20 passages du fil de chaîne à travers les éléments de guidage, mais aussi au travers des œillets de lice, et du peigne.

II. 4) Œillets

Nous désignons par « œillets » tous les orifices par lesquels le fil de chaîne passe afin d'être guidé de la sortie de sa bobine, jusqu'au tissu.

Il peut s'agir d'éléments fixes, comme les œillets d'un cantre (voir figure 2-12), ou d'éléments mobiles, comme l'œillet des lices.



Figure 2-12 Œillet guidant le fil à la sortie d'une bobine [68]

A cet endroit, le fil est par besoin redirigé, ce qui implique qu’il existe un angle d’attaque plus ou moins important du fil vis-à-vis de l’œillet, comme le montre la figure 2-13. Les fils sur les nappes inférieures et supérieures subissent un angle d’attaque (α_2) plus important que les fils dans la zone médiane (α_1).

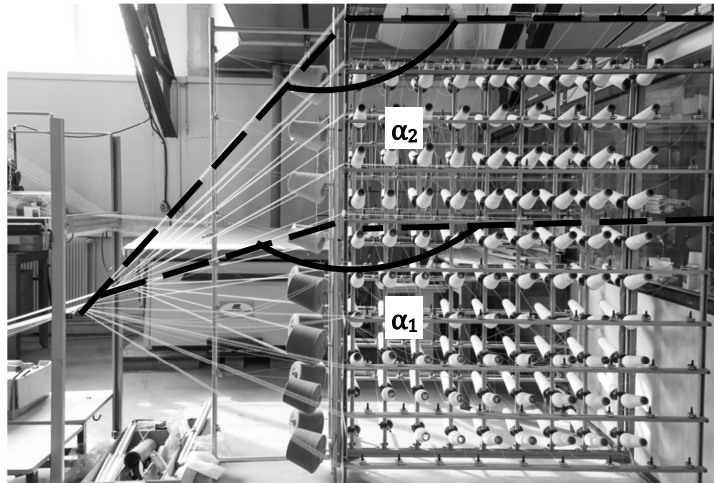


Figure 2-13 Angles de sortie de fils de chaîne sur un cantre [68]

De même que pour l’angle d’attaque, le matériau de l’œillet et sa forme ont aussi un impact sur la nature et l’intensité des frottements entre l’œillet et la mèche de carbone. Il existe une variété très importante de guide-fils destinés à des applications spécifiques tout aussi variées.

En tissage, la majorité des œillets, à l’exception des lices (qui sont métalliques) utilisés sont en céramique.

La céramique offre en effet une grande résistance mécanique, une forte dureté, ainsi qu’une résistance élevée à l’usure, alliée à une conductivité thermique faible. Les principaux matériaux couramment utilisés sont (par ordre de prix croissant) :

- L’alumine,
- La zircone,
- Le titanate d’aluminium.

Un comparatif de ces trois matériaux est proposé en table 2-5.

Ces céramiques peuvent ensuite être traitées, mécaniquement ou chimiquement, ce qui rend la surface de la céramique encore plus lisse.

Dans ce champ d'étude, nous testerons un œillet en alumine polie, et un œillet en titanate d'aluminium traité pour être conducteur. Ce dernier est recommandé dans le cadre d'utilisation avec risque d'accumulation de charges électrostatiques.

Matériau	Alumine	Zircone	Titanate d'aluminium
Formule chimique	Al ₂ O ₃	ZrO ₂	Ti ₃ Al
Propriétés	Dureté et résistance à la traction élevée	Excellentes propriétés mécaniques aux températures élevées	Faible expansion thermique
	Haute résistance à l'abrasion et à la corrosion,	Conductivité thermique faible à température ambiante	Faible conduction thermique
	Bonne conductibilité thermique	Conducteur électrique à T>1000°C	Faible module d'élasticité
	Excellent isolant électrique	Grande dureté	Bonne résistance à la corrosion
	Peu cassant	Bonne résistance à l'usure	Excellente résistance aux chocs thermiques
	Résistance mécanique élevée en température.	Bonne inertie chimique	
Prix	+	++	+++

Table 2-5 Comparatif des matériaux d'œillet utilisés en tissage

II. 5) Matière

Lee *et al.* [25] ont testé deux natures de carbone : A et B (voir table 2-6), de propriétés mécaniques différentes. Ils les ont sélectionnés à plusieurs étapes du procédé de tissage, et les ont testés mécaniquement. Ils ont montré que le pourcentage relatif de perte de propriétés mécaniques dépendait de la fibre testée (voir table 2-7).

	Carbon A	Carbon B
Strength (MPa)*	578 ± 6	686 ± 65
Modulus (GPa)*	64 ± 2	70 ± 2
Strain-to-Failure (%)	0.83 ± 0.11	1.21 ± 0.19

*Values normalised to a uniform fibre volume fraction (in the warp layers) of 30.4%.

Table 2-6 Caractéristiques mécaniques des mèches de carbone A et B testées par Lee. *et al.* [25]

	Carbon A				Carbon B			
	Manufacturer	As-Received†	Damaged†	Woven‡	Manufacturer	As-Received†	Damaged†	Woven‡
Strength* (MPa)	3530	2256 (4.1)** [6]***	1992 (13.9) [11]	1523 (1.8) [2]	3950	2786 (4.9) [6]	2791 (7.3) [10]	1930 (1.0) [2]
Modulus* (GPa)	230	186 (9.0) [6]	189 (6.9) [11]	168 (2.9) [3]	238	189 (9.1) [6]	185 (9.2) [10]	186 (5.7) [3]
Strain-to-Failure* (%)	1.50	1.22 (10.4) [6]	1.08 (12.6) [11]	0.89 (7.2) [2]	1.55	1.49 (11.7) [6]	1.42 (18.9) [10]	1.07 (11.3) [2]

*Normalised to the fibre volume fraction in the loading direction.

** () Coefficient of variance in percentage.

*** [] Number of specimens considered.

†From Equations (1), (2) and (3).

‡From Equations (5), (6) and (7).

Table 2-7 Comparaison des propriétés de la mèche de carbone A et B à différents stades : Données fournisseur, à réception, au cours du tissage, et dans le tissu [25]

Nous remarquons que la référence de la fibre a un impact sur l’abattement des propriétés mécaniques de la mèche de carbone. Pour cette raison, nous testerons deux types de fibres : une fibre haute résistance (HR) et une fibre de module intermédiaire (IM).

Un autre paramètre potentiellement influant est le titre de la mèche de carbone. Nous avons vu dans le chapitre précédent qu’il existait différents titres standards de mèches de carbone utilisés pour la fabrication de préformes pour les matériaux composites. Au niveau du tissage, les filaments périphériques d’une mèche de carbone 3K subiront moins de frottements avec les œillets comparativement à leurs homologues en 12K. En effet, la surface de contact entre l’œillet et la mèche augmente lorsque le nombre de filaments qui la composent augmente (voir figure 2-14). Cependant, cette augmentation n’est pas nécessairement linéaire. Compte-tenu de la tension de la mèche, celle-ci a en effet tendance à s’aplatir sur l’œillet, et seule une portion des fibres seront impactés par la dégradation.

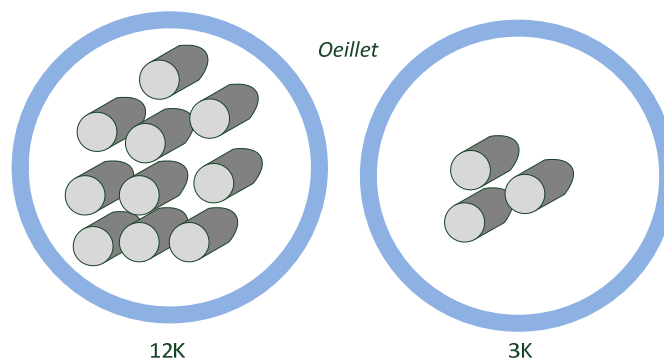


Figure 2-14 Mèches de carbone 12K et 3K dans un œillet de taille identique

Deux titres de mèche de carbone seront testés : 3K et 12K.

Rappelons que l’influence de l’ensimage sur la résistance au frottement de la mèche de carbone sera étudiée. En effet, la finalité de l’ensimage est de faciliter la manipulation de la mèche, mais aussi de la protéger des frottements. Le comportement d’une mèche ensimée à 1,1%, à 0,5% et celui d’une mèche non-ensimée seront comparés pour mettre en évidence le rôle de l’ensimage sur la dégradation de la mèche.

III) Plan d’expérience

L’AMDEC orienté santé matière de la mèche de carbone a permis de mettre en évidence quatre familles principales de facteurs influents sur la dégradation de la mèche de carbone au cours du procédé de tissage (cf. chapitre II §I). Dans le paragraphe précédent, une analyse cinématique a permis de quantifier les valeurs standards que prenaient ces différents paramètres dans l’industrie, en fonction d’hypothèses délimitant le domaine d’étude (cf. chapitre II §II).

Le recours à la méthodologie des plans d’expériences permet d’organiser au mieux l’ordre des essais et d’en réduire le nombre, optimisant ainsi l’étude expérimentale.

III. 1) Présentation

La première étape consiste à recenser les paramètres du système. Ces paramètres, appelés « facteurs », correspondent à des grandeurs physiques contrôlées [69]. Dans le cas présent, il s'agit des paramètres influents mis en évidence via l'AMDEC.

Différents types de facteurs peuvent être recensés :

- Continus, lorsqu'ils peuvent prendre toutes les valeurs possibles.
- Discrets, lorsqu'ils ne peuvent prendre que des valeurs particulières.
- Ordonnables. Il s'agit de facteurs discrets organisés suivant une logique.
- Booléens. Ce sont des facteurs discrets qui ne peuvent prendre que deux valeurs.

Les valeurs associées à ces facteurs, appelées « niveaux », sont celles obtenues grâce à l'état de l'art ainsi qu'à l'analyse cinématique.

Les deux grandeurs d'intérêt, ou « réponses » qui seront étudiées ici, seront, d'une part une grandeur mécanique (en l'occurrence, la résistance à la traction de la mèche) et d'autre part une grandeur numérique (santé matière) découlant de l'analyse d'images.

L'objectif du plan d'expérience est de déterminer les fonctions f et g qui lient respectivement les réponses mécaniques y et numériques z aux facteurs x_i .

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_i) \quad (2.9)$$

$$z = g(x_1, x_2, x_3, \dots, x_i) \quad (2.10)$$

III. 2) Choix du plan d'expérience

Il existe différents types de plans d'expériences.

Les plus simples d'entre eux sont les plans factoriels complets. Avec deux niveaux (un niveau bas et un niveau haut) et k facteurs, le nombre d'essais à réaliser est alors de 2^k . Plus le nombre de facteurs est élevé, plus le nombre d'essais à réaliser est important (4 essais pour un plan à 2 facteurs – 2 niveaux, 64 pour un plan à 6 facteurs – 2 niveaux). Au-delà de 5 facteurs, afin de réduire le nombre d'essais à réaliser, des plans factoriels fractionnaires sont généralement utilisés [70].

Si le nombre d'essais induit par un plan d'expérience factoriel fractionnaire est encore trop important, nous pouvons alors avoir recours à des plans d'expériences optimisés. Citons parmi les plans d'expérience optimisés, les matrices de Hadamard, les matrices de Taguchi, les matrices de Hoke,

Dans le cas présent, les facteurs à tester sont nombreux, parfois continus, parfois discrets, ordonnables ou booléens. Pour simplifier le plan d'expérience, et réduire le nombre d'essais à réaliser, seuls des facteurs discrets seront utilisés. Par exemple, la vitesse du peigne est un facteur continu, qui peut prendre toutes les valeurs entre $X \text{ mm.min}^{-1}$ et $Y \text{ mm.min}^{-1}$. Afin de rendre ce facteur discret, seuls deux niveaux seront conservés : un niveau bas à $X_{\min} \text{ mm.min}^{-1}$ et

un niveau haut à Y_{\max} mm.min⁻¹. Une fois les facteurs influents identifiés, la loi de corrélation peut être affinée en augmentant les niveaux associés.

La configuration retenue est donc celle de plusieurs facteurs (compris entre 2 et 5) à deux niveaux.

Le plan d'expérience le plus adapté est donc un plan factoriel fractionnaire.

III. 3) Facteurs et niveaux

Afin de garantir les meilleurs résultats, et en raison des très nombreux facteurs identifiés, ceux-ci sont séparés en plusieurs espaces expérimentaux ou sous plans d'expériences.

L'espace expérimental d'un plan à k facteurs comprend tous les points de l'espace euclidien à k dimensions compris dans le domaine de variation du facteur considéré (voir figure 2-15).

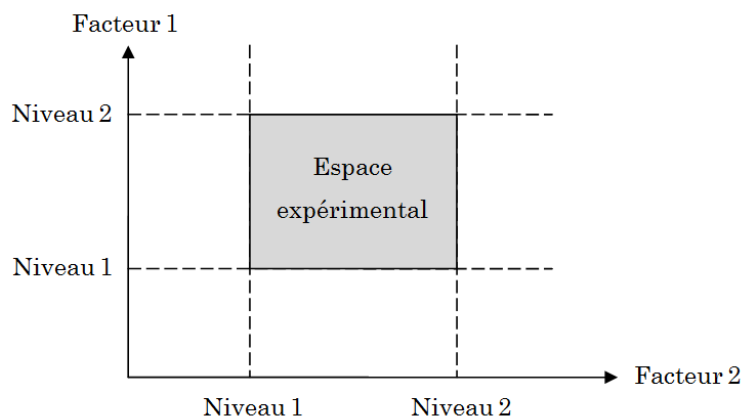


Figure 2-15 Notion d'espace expérimental

Plusieurs options sont alors possibles pour catégoriser les différents paramètres mis en évidence.

Le choix qui a été fait pour cette étude est de réaliser un classement en fonction de leur mouvement cinématique, dans le référentiel de la pièce. Nous avons donc trois catégories, représentées sur la figure 2-16 :

- Les éléments de guidage, fixes dans le référentiel de la pièce, type guides-fils, œillets, etc... (a) ;
- Les lices, portées par les cadres, qui ont un mouvement d'aller-retour vertical, dans le référentiel de la pièce (b) ;
- Le peigne de tassage, qui a un mouvement d'aller-retour horizontal, dans le référentiel de la pièce (c).

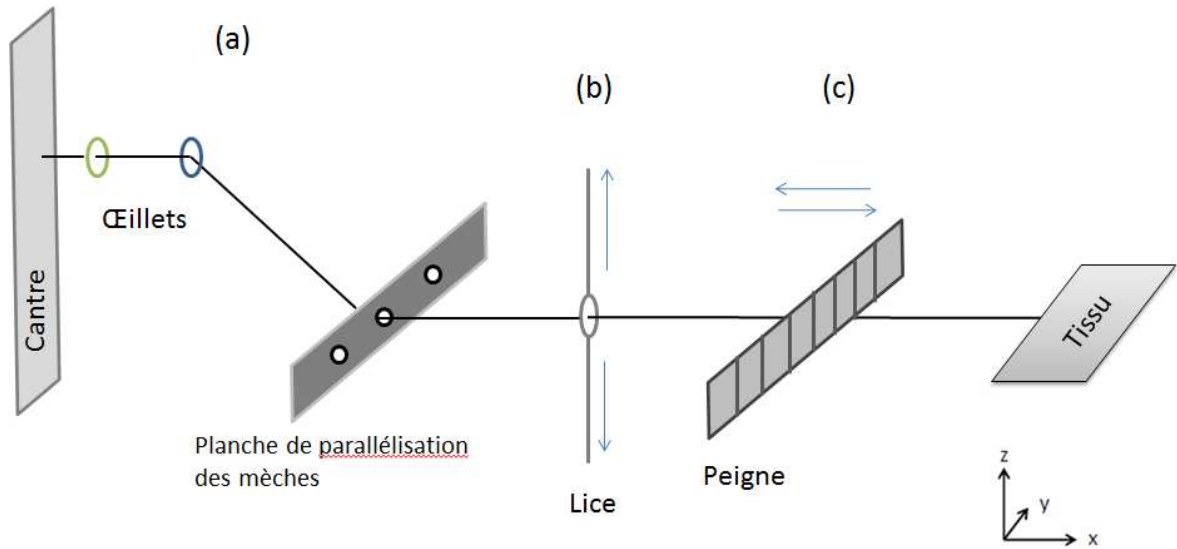


Figure 2-16 Schéma des paramètres procédés en fonction de leur mouvement

A ces trois catégories s'ajoute une campagne sur la matière (titre et ensimage de la mèche de carbone) et la cinématique du fil de chaîne (vitesse et tension de défilement du fil de chaîne).

Le tableau récapitulatif des facteurs et niveaux associés à chaque campagne est donné en table 2-8.

Pour chaque campagne, certains paramètres sont variables, et certains paramètres sont figés (« F » sur la table 2-8).

Chapitre II –Risques d’endommagement au cours des procédés

CAMPAGNE 1			CAMPAGNE 2			CAMPAGNE 3 et 4						CAMPAGNE 5			CAMPAGNE 6		
OEILLETS			CINEMATIQUE			MATIERE						CADRES			PEIGNE		
						ENSIMAGE			TITRE								
Paramètres	Nb de niveaux	Valeurs des paramètres	Paramètres	Nb de niveaux	Valeurs des paramètres	Paramètres	Nb de niveaux	Valeurs des paramètres	Paramètres	Nb de niveaux	Valeurs des paramètres	Paramètres	Nb de niveaux	Valeurs des paramètres	Paramètres	Nb de niveaux	Valeurs des paramètres
Matériaux	2	Alumine polie	Vitesse	2	0,05 m.min-1	Quantité d'ensimage	3	0%	Titre	3	3K	Matériaux	F		Matériaux	F	
		Titanate d'aluminium			0,5 m.min-1			0,50%			6K	Géométrie	F				Géométrie
Géométrie	2	R1	Tension	2	100g			1,01%			12K	Type de mouvement des cadres	2	Symétrique	Course	2	50 mm
		R2			400g	AS7	IM7	Asymétrique	250 mm								
Angle d'attaque	2	90°	Nombre de cycles	2	5 cycles	Référence	2	IM7	Référence	2	AS7	Vitesse	2	1 m.s-1	Vitesse du peigne	2	0,6 m.s-1
		15°			20 cycles			Titre			F						Ensimage
Nombre de cycles	2	1 cycle	Œillet	F		Vitesse	F		Vitesse	F		Hauteur de montée	2	50 mm	Calibre	2	2 dents/cm
		10 cycles	Matière	F		Tension	F		Tension	F				300 mm			4 dents/cm
Vitesse	F					Nombre de cycles	F		Nombre de cycles	F		Position relative de la mèche par rapport à l'œillet	2	Mèche à l'intérieur de l'œillet	Angle d'attaque	2	0°
Tension	F										Mèche connexe			30°			
Matière	F											Vitesse	F		Densité de fils de chaîne	F	24 fils/cm
															Tension	F	

Table 2-8 Campagnes du plan d'expérience

III. 4) Résolution du plan d'expérience

Le logiciel utilisé pour la résolution des plans d'expérience mentionnés ci-dessus est Minitab® 16.

Une fois les essais expérimentaux réalisés, les résultats mécaniques et morphologiques obtenus sont traités comme grandeurs de sortie.

L'utilisation d'un logiciel de traitement de données permet d'accélérer le temps d'analyse et donc de traiter un plus grand nombre de résultats.

Pour un plan d'expérience donné, l'analyse se fait en trois temps :

- l'analyse du plan d'expérience,
- la régression linéaire,
- le pas à pas.

Les résultats obtenus sont sous la forme donnée en table 2-9.

Terme	Effet	Coeff	Coef ErT	T	P
Constante		671,95	20,70	32,46	0,000
Vitesse	-127,26	-63,63	20,70	-3,07	0,004
Tension	95,29	47,65	20,70	2,30	0,027
Nombre de cycles	247,07	123,54	20,70	5,97	0,000
S = 130,927 SomCar-ErrPrév = 761865 R carré = 58,31 % R carré (prév) = 48,53 % R carré (ajust) = 54,84 %					

Table 2-9 Exemple de résultats obtenus par l'analyse du plan d'expérience
Résultats pour la grandeur « Force max » en Newtons dans la campagne 2 : « Cinématique »

La grandeur « effet » est un indicateur de la puissance relative des effets [71]. Plus sa valeur absolue est grande, plus l'influence du terme est importante.

La grandeur « Coeff » est le coefficient pondérateur de chaque terme. Il permet de calculer l'équation liant les facteurs et la réponse. Dans l'exemple de la table 2-9, la force maximale (en N) est reliée à la vitesse, la tension et le nombre de cycles par l'équation :

$$\text{Force max}(N) = 671,95 - 63,63 \times \text{Vitesse} + 47,65 \times \text{Tension} + 123,54 \times \text{Nombre de cycles}$$

La valeur de P permet de déterminer les termes statistiquement significatifs. Pour cela, il faut comparer P avec le niveau du paramètre α .

Ce niveau du paramètre α , aussi appelé seuil de signification, correspond à la probabilité de commettre une erreur de 1^{ère} espèce, à savoir de rejeter une hypothèse qui aurait dû être acceptée. Plus les conséquences d'une erreur de 1^{ère} espèce sont graves, plus le niveau du paramètre α doit être fixé à un niveau bas.

Généralement, le niveau du paramètre α est fixé à 0,05, ce qui correspond à un test statistique significatif à 5%. Cela signifie que seulement moins de 5% des résultats sont liés au hasard.

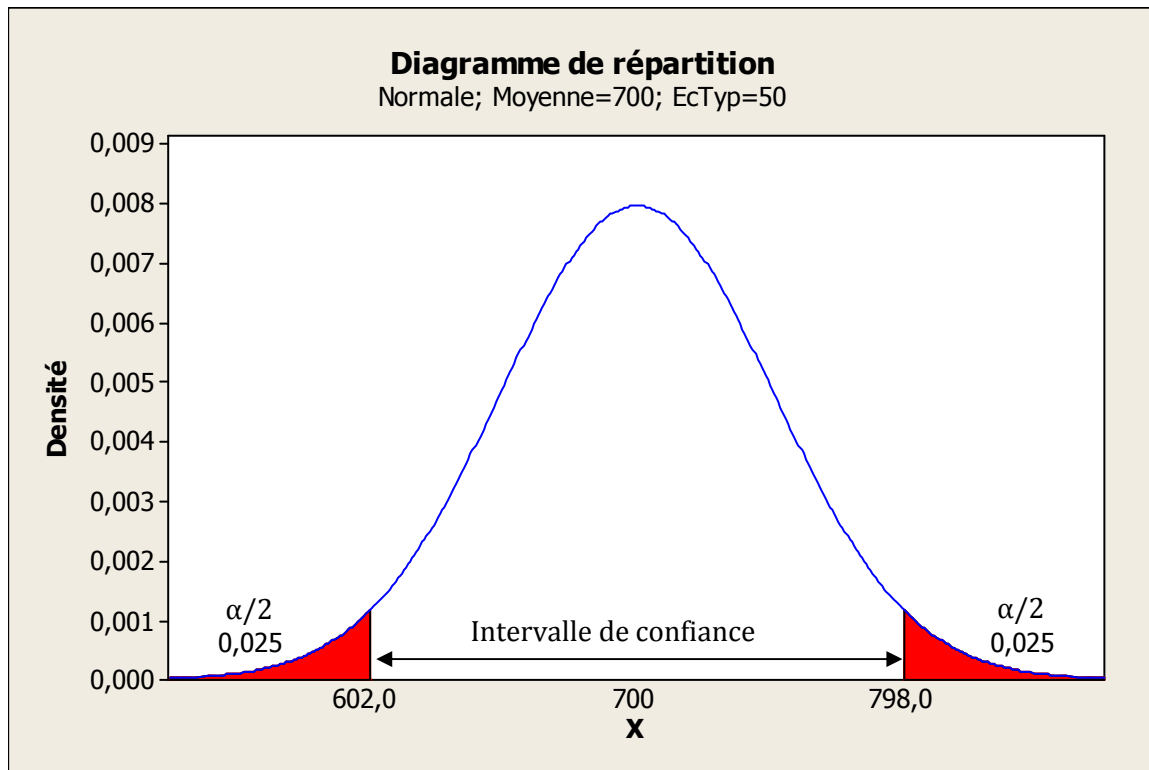


Figure 2-17 Exemple de diagramme de répartition d'une distribution de moyenne=700 et d'ecart-type=50 avec un seuil de signification $\alpha=0,05$

Lorsque $P < \alpha (=0,05)$, l'effet du terme est significatif. Dans l'exemple de la campagne « oeillets », les termes « vitesse » et « nombre de cycles » sont statistiquement les plus significatifs (voir figure 2-18).

Enfin les valeurs de « R carré », « R carré (prev) » et « R carré (ajust) » représentent la variation entre les données de réponse qui est expliquée par les prédictors.

- R représente la proportion de la variabilité de la réponse expliquée par le modèle.
- R prévu indique à quel point le modèle représente une bonne prévision des données.
- R ajusté est une version modifiée de R, ajustée au nombre de termes dans le modèle. Cette valeur permet de comparer des modèles n'ayant pas le même nombre de termes, à partir des mêmes données.

Nous pouvons ensuite utiliser le graphique des effets principaux pour observer rapidement les effets des termes sur la moyenne des réponses (voir figure 2-18).

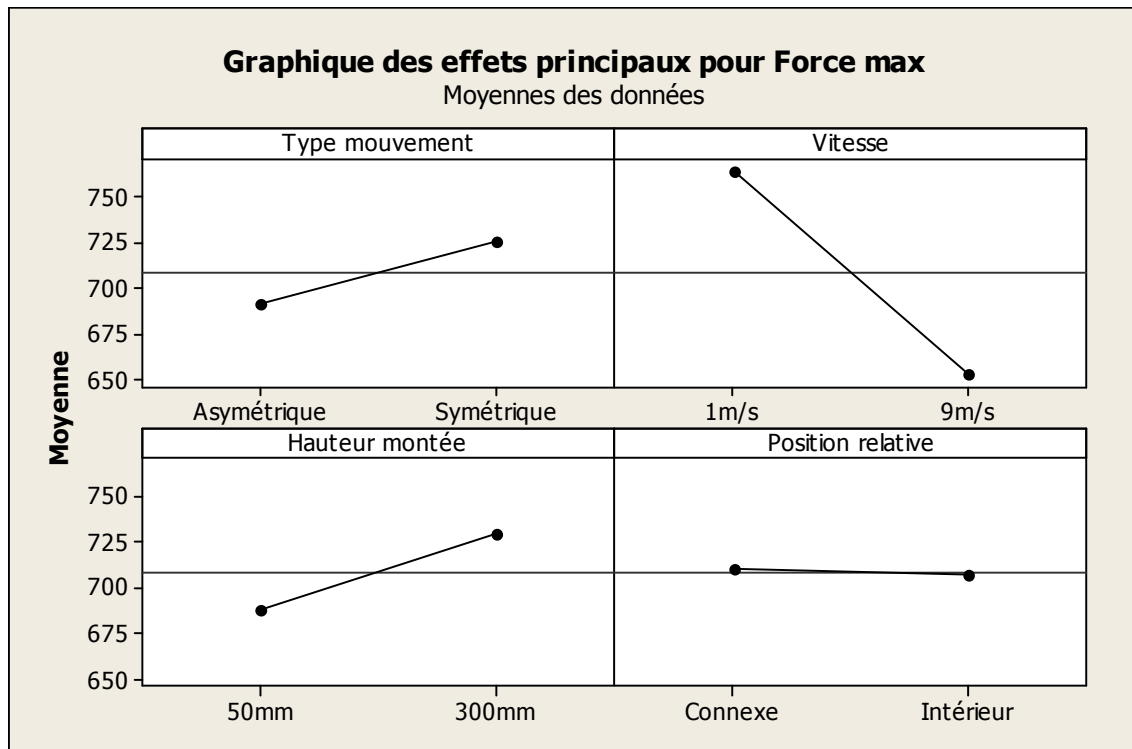


Figure 2-18 Exemple de graphique des effets principaux sur la force maximale (N) pour la campagne "Cadres"

Plus la pente de la droite reliant les deux moyennes est importante, plus l'effet du facteur concerné est significatif. Par exemple pour la figure 18, nous pouvons constater que qualitativement le paramètre le plus important est la vitesse et le moins important la position relative.

Cette première étude sur les effets principaux étant basé sur deux valeurs de paramètres, il conviendra par la suite de consolider les tendances observées par des études plus approfondies.

Le diagramme des interactions permet d'affiner ces résultats en observant l'effet combiné de deux facteurs sur la moyenne de la réponse.

Par exemple, sur le diagramme des interactions de la campagne « Œillets » donné en figure 2-19, nous constatons que pour le matériau titanate ou alumine, l'influence du facteur « géométrie », petit ou grand diamètre, est le même. Il n'y a donc pas d'interaction entre ces deux facteurs. A l'inverse, suivant le matériau utilisé, le nombre de cycles n'a pas le même impact sur la force maximale (en N). Dans un cas, le nombre de cycles croissant fait chuter la force maximale (titanate), dans l'autre, il n'a pas d'influence, voire il améliore légèrement la force maximale (alumine).

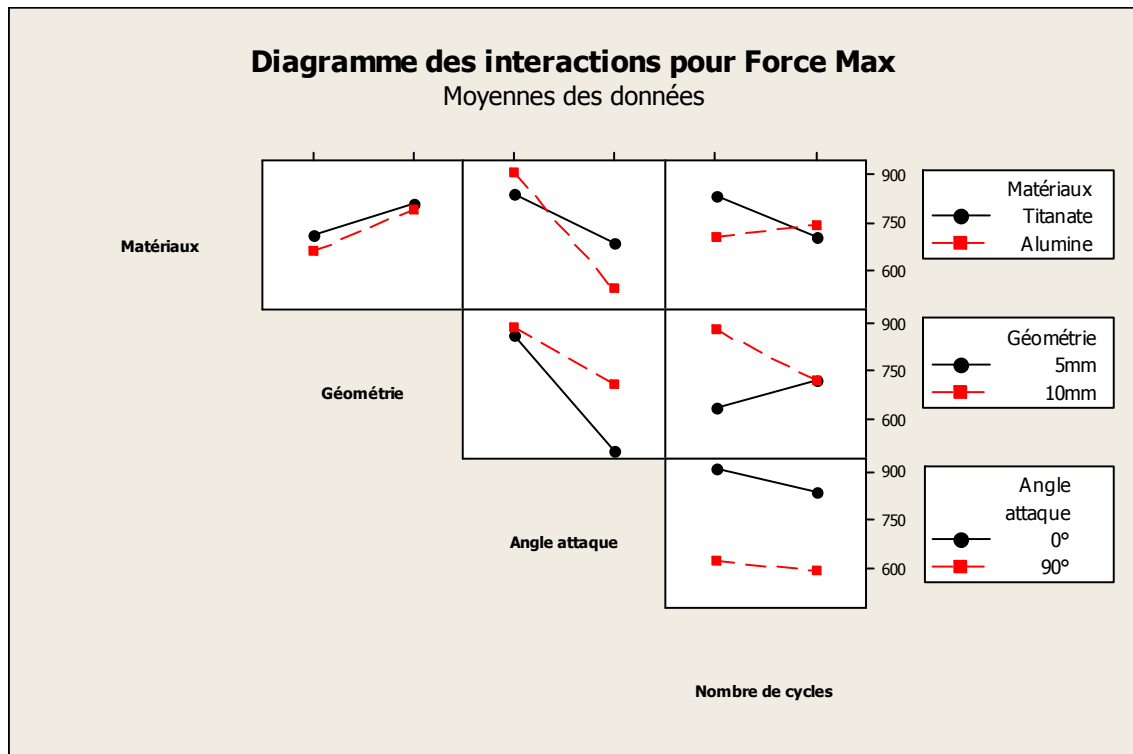


Figure 2-19 Exemple de diagramme des interactions sur la force maximale (N) pour la campagne "oeillets"

De manière générale, plus les droites sont parallèles, moins il y a d'interaction entre les facteurs concernés. A l'inverse, si les droites sont sécantes, il convient alors de vérifier le niveau d'interaction, grâce à la valeur de P associée au facteur correspondant à l'interaction considérée.

Conclusions du chapitre II

Dans ce chapitre, l'outil d'analyse des modes de défaillance de leurs effets et leurs criticités, a été appliqué à la mèche de carbone au cours du procédé de tissage, en considérant l'endommagement matière comme une défaillance. Cette étude a permis de mettre en évidence quelles étapes pouvaient potentiellement influencer sur l'endommagement de la mèche.

Les différents paramètres identifiés ont été listés puis regroupés par famille. Un état de l'art des pratiques actuelles en matière de tissage de la fibre de carbone, ainsi qu'une étude cinématique du procédé de tissage ont permis de quantifier les valeurs usuellement retenues pour ces paramètres. Comme cela a été mentionné, en raison des secrets de fabrication et du caractère souvent confidentiel du tissage carbone, il est très difficile d'obtenir des informations de la part des industriels. Un certain nombre de choix d'études a donc dû être fait. Dans la plupart des cas, pour chaque paramètre identifié, les valeurs extrêmes ont été retenues comme niveaux, l'objectif étant de mettre en évidence l'influence de ces paramètres sur l'endommagement de la mèche.

Un plan d'expérience a permis de minimiser le nombre d'essais à réaliser. Malgré tout, le nombre très important de paramètres à tester a nécessité de diviser ce plan d'expérience en plusieurs campagnes, correspondant aux différentes familles de paramètres influents. Chaque campagne présente des points de recouvrement qui permet de la lier aux autres campagnes. Ces sous-plans d'expériences sont ensuite analysés grâce à des outils statistiques. Cette analyse permet de relier les différents paramètres influents avec l'endommagement de la mèche.

Dans le chapitre suivant seront détaillés les protocoles mis en place pour mettre en œuvre la modélisation expérimentale des paramètres influents correspondant aux données d'entrée. Puis, deux types de caractérisation – destructive et non-destructive – seront proposées afin d'identifier plusieurs types d'indicateurs pertinents de l'endommagement engendré. Ces indicateurs constitueront les grandeurs de sortie du plan d'expérience.

Chapitre III – Méthodes de caractérisation

Dans le chapitre précédent, les principaux paramètres influents sur l'endommagement de la mèche de carbone au cours du procédé de tissage ont été identifiés.

Ce chapitre est consacré à la modélisation expérimentale de cet endommagement, puis à sa caractérisation mécanique et morphologique par analyse d'images.

Une première partie détaille la méthodologie pour modéliser et mettre en œuvre les différents paramètres d'endommagement : les données d'entrée du plan d'expérience.

Dans une deuxième partie sont définis les critères morphologiques de l'endommagement de la mèche de carbone, ainsi que le protocole de caractérisation qui permet de les recueillir.

Enfin, une troisième partie présente le protocole de caractérisation mécanique des mèches qui a été mis au point pour tester la mèche de carbone sèche en traction.

PLAN DU CHAPITRE

I)	MODELISATION EXPERIMENTALE DE L'ENDOMMAGEMENT	101
I. 1)	Objectif	101
I. 2)	Approche retenue	101
I. 3)	Protocole	103
II)	CRITERES DE CARACTERISATION DE L'ENDOMMAGEMENT	105
II. 1)	Paramètres descriptifs d'une mèche.....	105
II. 2)	Mesure mécanique de la dégradation d'une mèche	106
II. 3)	Mesure morphologique de la dégradation d'une mèche.....	107
III)	CARACTERISATION PAR TRAITEMENT ET ANALYSE D'IMAGES.....	109
III. 1)	Acquisition d'images	112
III. 2)	Traitement de l'image	112
III. 3)	Détection des pixels carbone	112
III. 4)	Détection du corps de la mèche.....	112
III. 5)	Mesure de la largeur du corps de mèche.....	112
III. 6)	Mesure de l'orientation des filaments à la surface du corps de la mèche.....	112
III. 7)	Conclusion sur la quantification des indicateurs morphologiques	113
IV)	PROTOCOLE DE CARACTERISATION MECANIQUE	113
IV. 1)	Normes existantes	113
IV. 2)	Protocole de traction sur mèche imprégnée	114
IV. 3)	Protocole de traction sur mèche sèche	116
CONCLUSION DU CHAPITRE III		123

I) Modélisation expérimentale de l'endommagement

Dans le chapitre précédent, les différents paramètres clés susceptibles d'être responsables de l'endommagement de la mèche de carbone au cours du procédé de tissage ont été identifiés. Afin de modéliser expérimentalement cet endommagement, et de réaliser une mèche dégradée sur mesure, un banc de test a été mis au point.

I. 1) Objectif

L'objectif du banc de test est de modéliser expérimentalement la dégradation de la mèche de carbone engendrée par les différents paramètres influents à chaque étape de la transformation textile, identifiés dans le chapitre précédent.

Ses fonctions principales sont de :

- recréer chaque opération de transformation textile de la mèche de carbone ;
- simuler l'environnement dans lequel se réalise chaque opération de transformation de la mèche ;
- piloter les paramètres de configuration et d'environnement du banc de test ;
- mesurer la configuration testée sur la base des paramètres environnementaux et procédé.

I. 2) Approche retenue

Les différentes étapes du processus de transformation textile sont reproduites indépendamment les unes des autres.

Le principe du banc de test consiste à dérouler une mèche de carbone issue de la bobine fournisseur à vitesse et tension contrôlées et de lui faire rencontrer différentes configurations représentatives des étapes clés du processus de transformation textile à température et hygrométrie mesurées (voir figure 3-1).

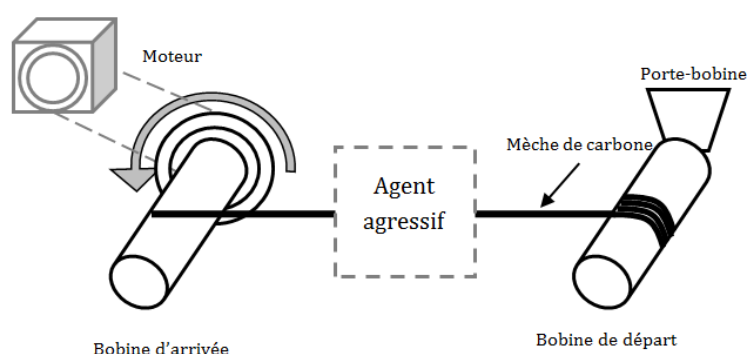


Figure 3-1 Schéma du principe de fonctionnement du banc de test

A la suite du chapitre II, plusieurs familles de paramètres jugés comme potentiellement influents sur l'endommagement de la mèche de carbone ont été identifiés :

- Les éléments fixes de guidage (type guide-fils) ;
- La cinématique (vitesse et tension du fil de chaîne) ;
- La matière (titre et ensimage) ;
- Les lices ;
- Le peigne de tassage.

Le banc de test doit donc permettre d'appliquer tous les facteurs et niveaux mis en évidence dans le plan d'expérience (cf. chapitre II §II.2).

Pour ne pas interférer dans la modélisation expérimentale, la mèche de carbone testée doit être manipulée le moins possible. Ainsi, la mèche de carbone « à l'état initial » provient directement de la bobine fournisseur, il n'y a pas de reconditionnement. De même, aucun guide-fil ne peut être utilisé, puisqu'il fait partie des facteurs étudiés.

A l'issue du protocole de modélisation expérimentale de l'endommagement, la matière dégradée est récupérée sur un bobinot. Elle est ensuite prélevée pour être, scannée, puis testée en traction.

La modélisation expérimentale de l'endommagement engendre un grand nombre de fibrilles, c'est-à-dire de filaments de carbone de faible longueur, issus de la rupture de la mèche initiale. Pour cette raison, et afin d'éviter des problèmes d'hygiène et sécurité, le banc a été conçu comme une enceinte fermée équipée d'un caisson d'aspiration (figure 3-2). Cela permet de récupérer par aspiration les fibrilles générées par les facteurs de dégradation. La masse de matière récupérée peut être traitée comme une donnée à part entière, réponse que nous pouvons inclure dans le plan d'expériences.



Figure 3-2 Photographie du banc de test

I. 3) Protocole

La matière entrante correspond à la bobine de mèche à tester. La première action à réaliser est donc de dévider la mèche de carbone de la bobine fournisseur. Un système de régulation de tension à ressort équipe le support de la bobine. Celui-ci permet de régler la tension de la mèche.

La mèche à tester rencontre ensuite un agent agressif. Il peut s'agir d'un élément fixe, tel qu'un œillet, ou un élément mobile, tel qu'une lice ou des dents de peigne.

Un dispositif type bielle-manivelle permet d'assurer le mouvement de translation rectiligne de ces éléments mobiles. En effet, un moteur linéaire, qui permet d'avoir un dispositif mécanique moins complexe ne permet pas d'atteindre les vitesses souhaitées.

Le fil dégradé (ou altéré) est ensuite stocké sur un bobinot. La matière sortante est donc une bobine de mèche de carbone dont l'état est altéré.

Les fibrilles sont récupérées à la fin de la mesure au moyen d'un aspirateur muni d'un filtre à poussière (HEPA classe H13¹⁰).

A l'issue de l'essai, une acquisition d'image de la mèche dégradée est réalisée au moyen d'un scanner EPSON® Perfection 2480 dpi (cf. chapitre III §II). Cette étape permet ainsi une caractérisation morphologique de l'endommagement.

La mèche endommagée définie selon une structure contrôlée est ensuite fixée dans des talons en aluminium pour former les éprouvettes. Celles-ci seront caractérisées mécaniquement par traction. Le protocole utilisé pour cette caractérisation est décrit dans le paragraphe III. Cette étape permet d'obtenir l'influence des différents facteurs sur les propriétés mécaniques de la mèche.

Une schématisation de l'ensemble de ces opérations est proposée dans le diagramme SADT¹¹ du banc de test (figure 3-3).

¹⁰ Efficacité de 99.99% sur des particules de 0,3 µm

¹¹ "Structured Analysis and Design Technique" ou "Analyse fonctionnelle descendante" en français

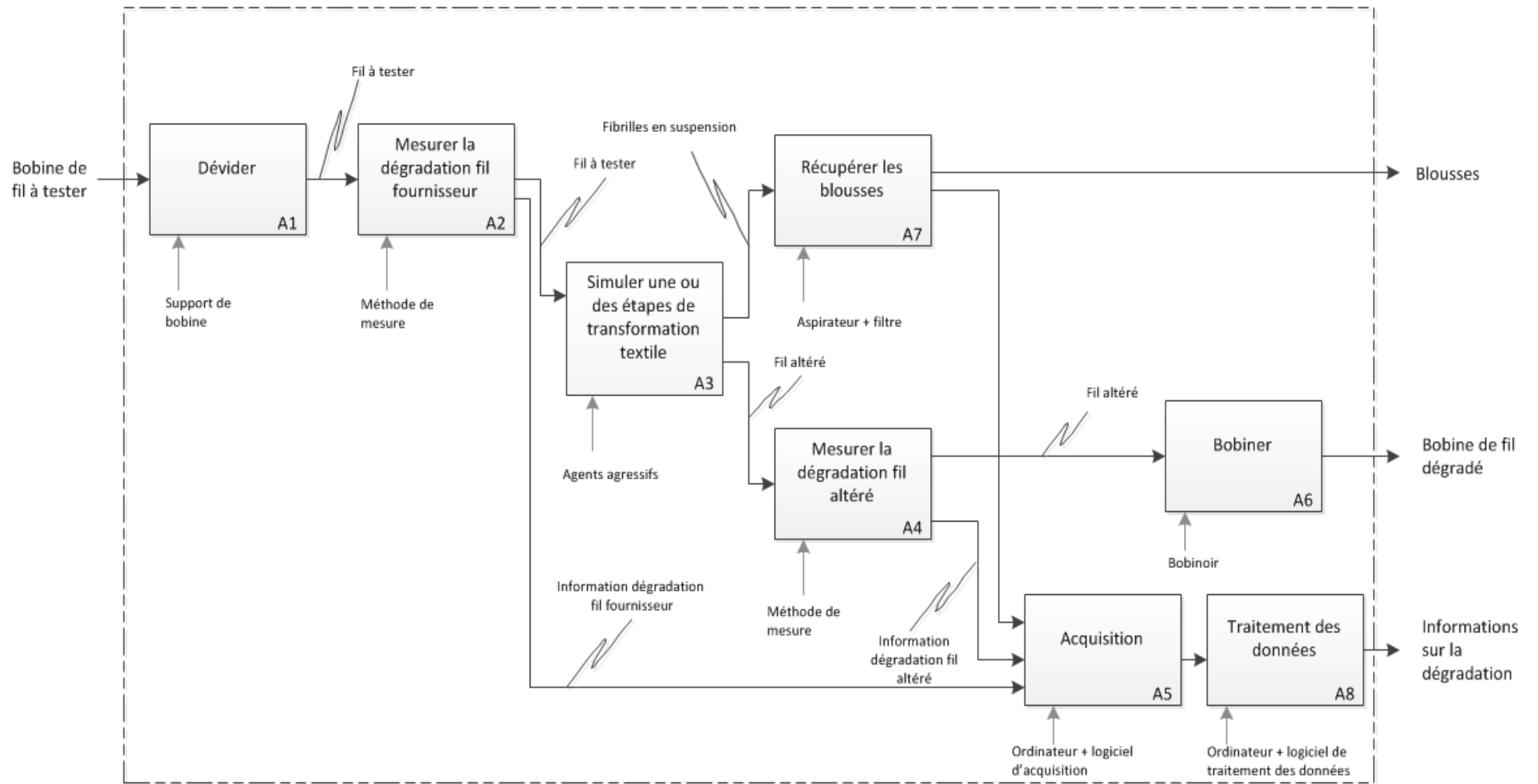


Figure 3-3 Diagramme SADT du banc de test

II) Critères de caractérisation de l'endommagement

Rappelons que l'objectif de cette thèse est de caractériser par une méthode non destructive la santé matière de la mèche après une ou plusieurs étapes de l'endommagement.

La méthode qui a été retenue est celle d'une caractérisation de la structure de la mèche par une analyse d'images quantitative. Nous pouvons alors soit effectuer des sections bidimensionnelles dans la mèche, soit utiliser une technique non-destructive qui, en général, donne une information tri-dimensionnelle du matériau. La première approche n'étant pas réalisable, l'approche retenue consiste à réaliser une acquisition d'images bidimensionnelle (par projection) au moyen d'un scanner, puis de traiter cette image afin d'identifier l'influence des facteurs étudiés sur la morphologie après dégradation. Il existe d'autres techniques non-destructives utilisables à l'échelle des mèches et des fibres, telles que la micro-tomographie à rayons X, la microscopie confocale et la tomographie à cohérence optique, mais difficilement adaptables à une analyse en continu.

II. 1) Paramètres descriptifs d'une mèche

II. 1. a) Paramètres morphologiques

Au sens morphologique, la mèche est principalement caractérisée par son titre, c'est-à-dire le nombre de filaments en section qui la compose.

Ces filaments sont quant à eux caractérisés par un diamètre moyen d (voir figure 3-4), généralement exprimé en micromètres.

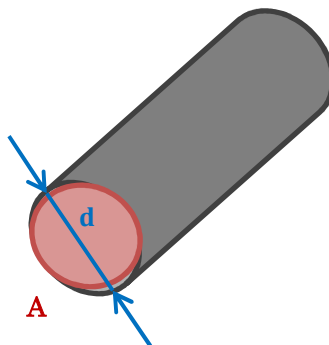


Figure 3-4 Diamètre apparent d et section A de la mèche

La mèche peut également être décrite par l'aire de sa section A en mm^2 .

La mèche peut être retordue ou non. Cette torsion est décrite par un taux de torsion qui correspond à un nombre de tour de la mèche sur elle-même par unité de longueur. Elle peut également être caractérisée par un angle de torsion (voir figure 3-5).

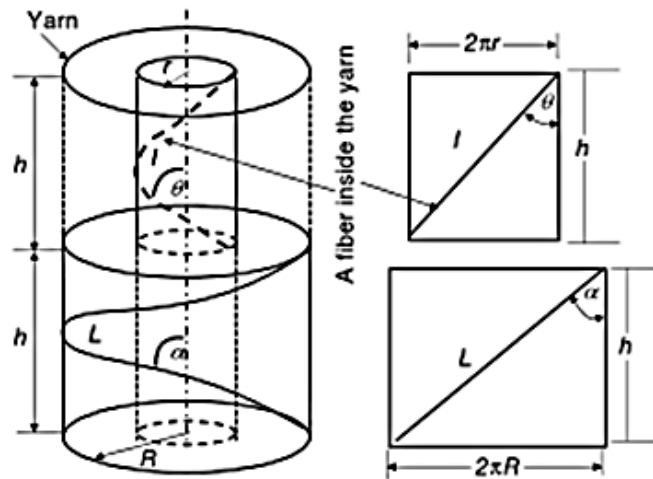


Figure 3-5 Structure théorique d'un fil torsadé [72]

II. 1. b) Paramètres mécaniques

Mécaniquement parlant, la mèche peut être décrite par sa résistance maximale à la traction, ou par sa contrainte à rupture, qui représente la force maximale avant rupture par unité de surface du matériau.

La mèche peut également être caractérisée par son module d'élasticité ou module d'Young.

II. 2) Mesure mécanique de la dégradation d'une mèche

Lorsque la fibre de carbone est utilisée comme renfort pour les matériaux composites, ce qui intéresse le concepteur, dans un premier temps, c'est son module en traction, sa résistance en traction et son allongement à rupture. Pour les propriétés à long terme des matériaux composites, d'autres paramètres seront considérés.

Les propriétés mécaniques de la mèche de carbone sont directement liées aux propriétés mécaniques des fibres qui la composent. Mais elles sont également liées à la longueur de ces fibres, leur angle de torsion, et leur coefficient de friction.

En effet, lorsque la mèche est sollicitée en traction, en considérant que la mèche est composée d'un faisceau de fibres parfaitement alignées et parallèles, alors les fibres périphériques de la mèche, en contact avec le dispositif de serrage, vont être directement sollicitées. En fonction de leur coefficient de frottement, les autres fibres, qui ne sont pas en contact avec le dispositif de serrage, vont glisser les unes par rapport aux autres, et fonction de la longueur des fibres, une partie de la mèche va se désolidariser du corps de mèche (voir figure 3-6).

La torsion va directement influencer les propriétés mécaniques de la mèche. En effet, elle va augmenter les frottements entre fibres. De plus, elle va avoir pour effet de davantage solliciter les fibres périphériques (qui sont plus torsadées) et de comprimer les fibres au cœur de la mèche.

Hearle *et al.* [73] ont montré que la résistance d'un fil (ensemble de filaments torsadés) était liée à l'angle de torsion et au coefficient de friction par la relation suivante :

$$\frac{\text{Résistance du fil}}{\text{Résistance de la fibre}} = \cos^2 \alpha [1 - k \cos ec \alpha] \quad (3.1)$$

Avec α l'angle de torsion et k défini par :

$$k = \frac{\sqrt{2}}{3Lf} \left(\frac{aQ}{\mu} \right)^{1/2} \quad (3.2)$$

Avec L_f la longueur moyenne des fibres, a le diamètre de la fibre, Q la période de migration et μ le coefficient de friction.

Lorsque la mèche de carbone est utilisée dans le cadre du procédé de tissage, nous avons vu au chapitre précédent qu'elle était soumise à de nombreux frottements et manipulations. Ces derniers ont pour conséquence un endommagement qui se traduit par un aspect pileux qui correspond à des ruptures de fibres ainsi que par l'application d'une torsion non-maîtrisée.

Une façon de quantifier cet endommagement consiste à étudier l'abattement des propriétés mécaniques en traction qui résulte de ces phénomènes.

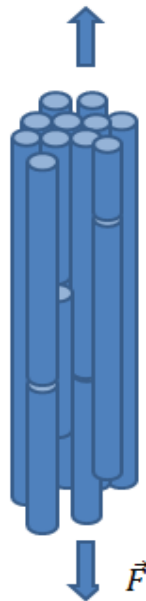


Figure 3-6 Sollicitation de la mèche en traction

II. 3) Mesure morphologique de la dégradation d'une mèche

Si l'endommagement de la mèche peut être quantifié en suivant l'évolution de ses propriétés mécaniques, une autre façon de procéder consiste à étudier ses propriétés morphologiques.

En effet, si l'endommagement s'accompagne d'une perte de propriétés mécaniques, cette perte est due a priori en partie à des phénomènes observables.

Ces phénomènes sont principalement :

- La rupture de fibres ;
- La torsion ou le désalignement des fibres de l'axe principal de la mèche ;
- La diminution du diamètre apparent de la mèche.

Par comparaison entre une image de mèche saine et de mèche dégradée, nous pouvons observer ces différents phénomènes.

La mèche saine, c'est-à-dire sortie de bobine fournisseur, est constituée de filaments continus parfaitement alignés, comme sur la figure 3-7.



Figure 3-7 Mèche de carbone AS7 12K

Une mèche de carbone ayant subi plusieurs passages, ne serait-ce qu'à travers un œillet de porcelaine, a une allure qui ressemble davantage à ce qu'on peut voir en figure 3-8. La mèche est plus ou moins torsadée. De nombreux filaments sont rompus et sortent du corps de la mèche. Le diamètre apparent de la mèche a diminué. Il y a certains défauts observables à la surface du corps de la mèche, comme des nœuds, des poussières, ou des amas d'ensimage.



Figure 3-8 Mèche de carbone AS7 12K après 20 passages à travers un œillet de porcelaine

Par traitement et analyse d'images, nous pouvons alors mesurer :

- La quantité de filaments cassés à une extrémité, mais maintenus en cohésion avec le corps de la mèche : (1) de la figure 3-9 ;
- La variation de diamètre/largeur apparente du corps de la mèche : (2) de la figure 3-9 ;

- La désorientation des filaments en cohésion avec le corps de la mèche : (3) de la figure 3-9 ;
- La quantité de filaments cassés, totalement sortis du corps de la mèche : (4) de la figure 3-9 ;

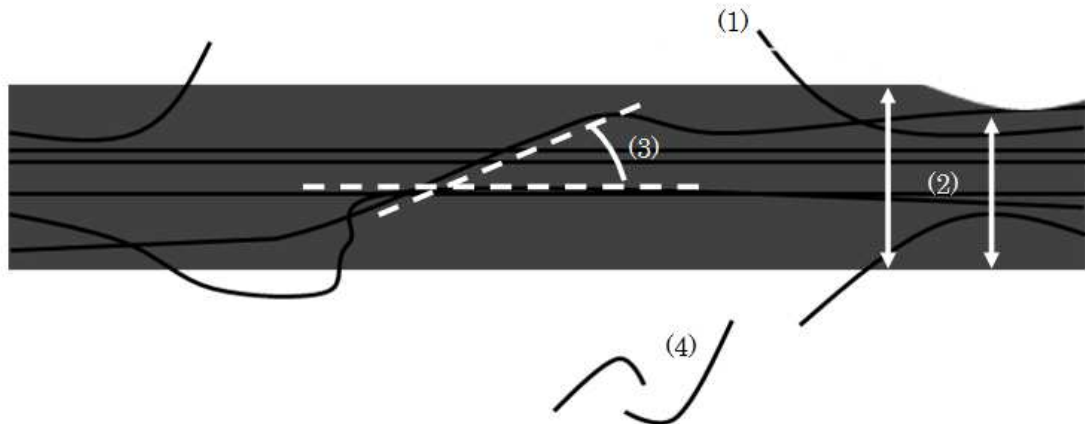


Figure 3-9 Schéma d'une mèche dégradée et des critères caractéristiques de cette dégradation

Ces grandeurs, résumées en figure 3-10, seront alors retenues pour quantifier l'effet de l'endommagement.

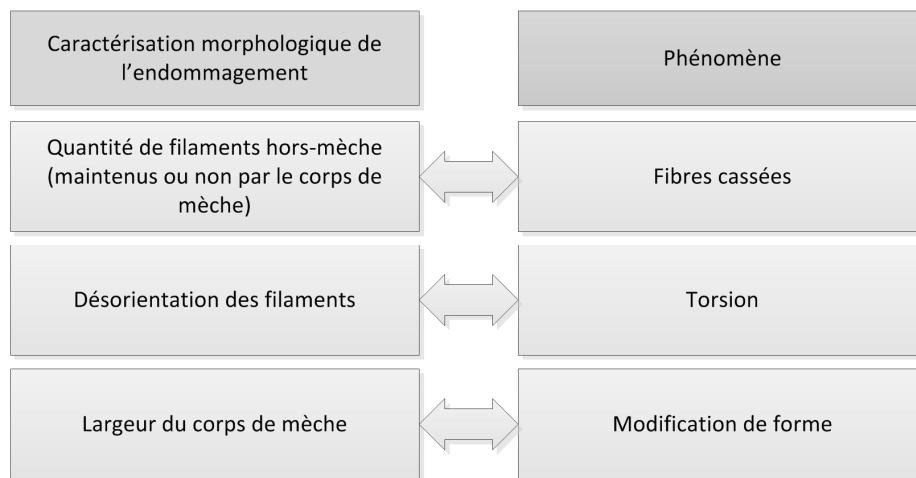


Figure 3-10 Grandeurs caractéristiques de l'endommagement retenues

III) Caractérisation par traitement et analyse d'images

L'avantage de la méthode optique, non-destructive, est qu'elle est répétable plusieurs fois sur la même mèche tout au long des différentes étapes du procédé. Cela permet d'obtenir un « historique », afin d'assurer un suivi de la dégradation (à condition bien sûr de mesurer systématiquement au même endroit).

Dans notre problématique, nous allons essentiellement nous intéresser aux méthodes issues de l'analyse d'images quantitative. Ces techniques s'adaptent bien à notre cas. Les mèches étudiées

sont biphasées et les images résultantes binaires, ce qui permet de dire que l'ensemble des objets constitués de pixels valant 0 -par exemple- constituent l'espace de vide – inter filament- et l'ensemble des objets pixelisés à 1 représentent les fibres.

La stéréologie permet l'étude quantitative de l'organisation spatiale d'un matériau à trois dimensions à partir de mesures –comptage de surfaces, lignes ou points qui interceptent les objets étudiés dans l'image- réalisées dans un espace de dimension inférieure.

Une distinction importante en stéréologie est de faire une mesure ou un comptage soit sur la totalité des objets-ce que l'on appelle l'analyse globale- soit sur la partie des objets visibles dans la zone d'observation -cadre de l'analyse locale.

Le protocole de traitement et d'analyse d'images suivi pour la caractérisation de ces critères a lieu en cinq temps :

- 1°) Traitement de l'image : cette opération facultative permet d'améliorer l'image d'origine (renforcer la netteté ou le contraste par exemple).
- 2°) Détecter le carbone : cette opération permet de distinguer les pixels carbone des pixels non-carbone (fond).
- 3°) Détecter le corps de la mèche : cette opération permet par exclusion de détecter les pixels carbone hors-mèche (filaments rompus).
- 4°) Mesurer la largeur du corps de la mèche : cette opération permet de mesurer les variations de largeur au sein de la mèche et de comparer différentes mèches entre elles.
- 5°) Détecter l'orientation des monofilaments visibles à la surface de la mèche : cette opération permet de mesurer l'angle formé entre les monofilaments et la direction de référence de la mèche afin d'obtenir le « taux de désorientation » des filaments d'une mèche donnée.

Ces différentes étapes sont schématisées dans la figure 3-11.

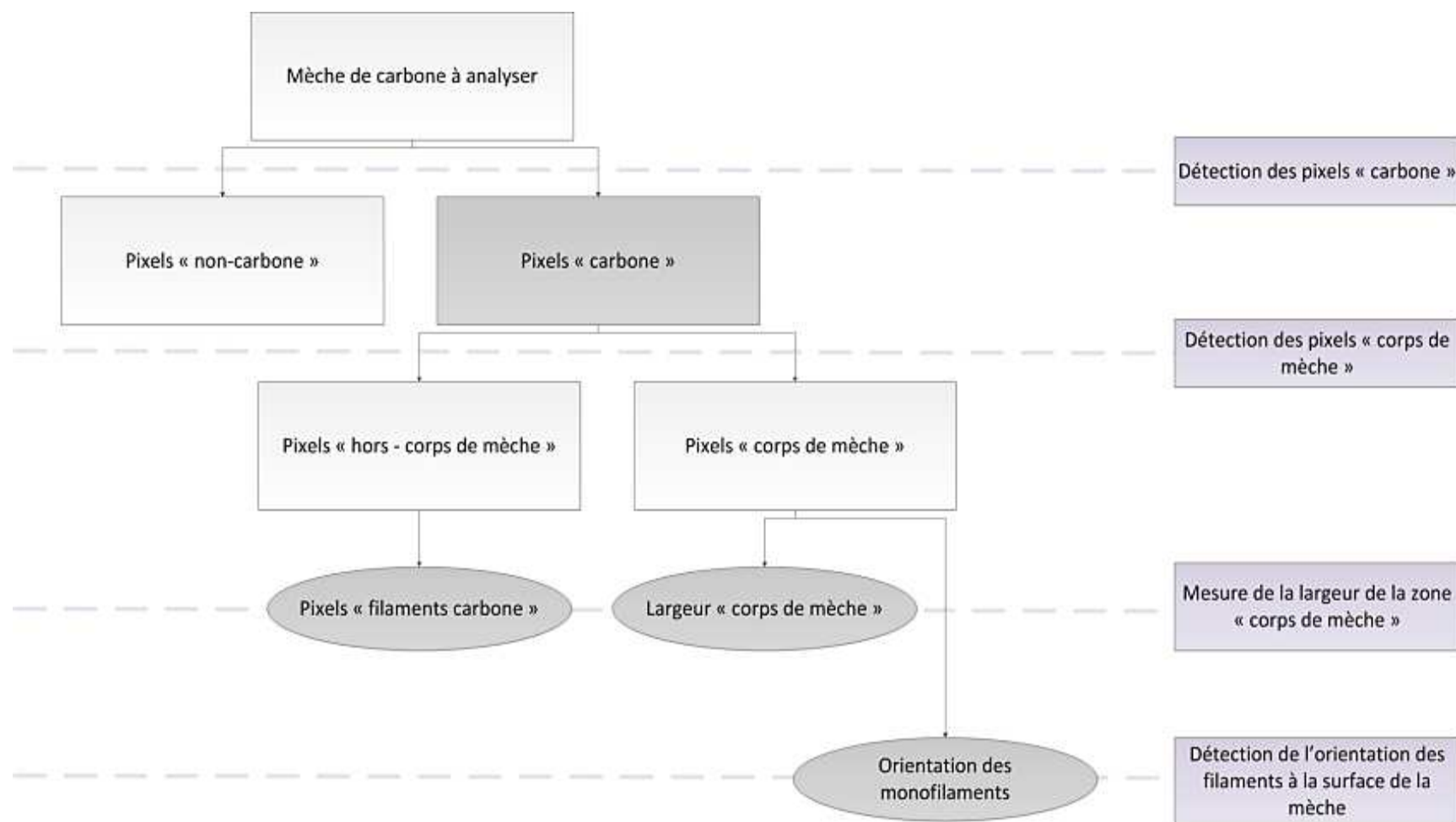


Figure 3-11 Protocole de caractérisation de l'endommagement par traitement et analyse d'images

III. 1) Acquisition d'images

Partie sous confidentialité non publiable.

III. 2) Traitement de l'image

Partie sous confidentialité non publiable.

III. 2. a) Ré-échantillonnage de l'image

III. 2. b) Passage en niveaux de gris

III. 2. c) Remplacement d'une couleur

III. 2. d) Renforcement de la netteté

III. 3) Détection des pixels carbone

Partie sous confidentialité non publiable.

III. 4) Détection du corps de la mèche

Partie sous confidentialité non publiable.

III. 5) Mesure de la largeur du corps de mèche

Partie sous confidentialité non publiable.

III. 6) Mesure de l'orientation des filaments à la surface du corps de la mèche

Partie sous confidentialité non publiable.

III. 6. a) Détermination de la direction de référence

III. 6. b) Méthode de squelettisation

III. 6. b. (i) Détection d'une région

III. 6. b. (ii) Détermination de la direction principale de la région

III. 6. c) Méthode de la transformée de Karhunen-Loeve (TKL)

III. 6. c. (i) Discrétisation

III. 6. c. (ii) Calcul des vecteurs propres de la région

III. 6. c. (iii) Résultats

III. 7) Conclusion sur la quantification des indicateurs morphologiques

Dans ce paragraphe ont été présentées les différentes grandeurs utilisées pour caractériser la morphologie de la mèche avant et après dégradation sur mesure.

Les limites de cette caractérisation reposent sur le caractère surfacique de la mesure. En effet, l'acquisition d'image ne permet d'avoir qu'une vision partielle de l'état de la mèche. Nous ne savons pas si des filaments ont été rompus au cœur de la mèche au cours de la dégradation. En effet, l'hypothèse qui a été faite est que l'endommagement de la mèche est principalement dû aux frottements entre cette dernière et les différents éléments extérieurs. Par conséquent, les filaments les plus susceptibles d'être rompus sont les filaments périphériques de la mèche, directement en contact avec ces agents agressifs. Cependant, dans le cas où cette hypothèse ne serait pas vérifiée, totalement ou en partie, l'acquisition d'image surfacique ne permettrait pas de le déceler. Ainsi, nous ne pourrions pas observer de corrélation entre la caractérisation mécanique et la caractérisation morphologique.

D'autre part, la difficulté pour obtenir une image de qualité peut également être un obstacle à la quantification de certains paramètres ; c'est le cas pour la mesure de la désorientation. En effet, peu d'images sont exploitables pour cette grandeur, limitant l'interprétation des résultats.

Enfin, comme pour la mesure mécanique, il est difficile de ne pas perturber l'état de la mèche lors de sa manipulation. En fonction de la manière dont celle-ci est placée sur le dispositif de mesure, il est possible que sa largeur ou sa configuration spatiale soit légèrement modifiée.

En conclusion, l'approche proposée pour quantifier les paramètres morphologiques de la mèche permet de recueillir plusieurs grandeurs. Cependant, cette mesure est soumise à une incertitude expérimentale pouvant compliquer la recherche de corrélation avec la caractérisation mécanique.

IV) Protocole de caractérisation mécanique

IV. 1) Normes existantes

Il existe plusieurs normes définissant les modalités de mesure des propriétés en traction d'une mèche de carbone (voir table 3-10). Ces normes varient d'un comité de normalisation à l'autre.

	AFNOR	DIN	JIS	ASTM
Traction mèches imprégnées	NF EN ISO 10618	29965	R 7601	D 4018
Traction monofilament	NF ISO 11566	65382	R 7601	D 3379

Table 3-10 Normes définissant les modalités de mesure des propriétés de traction des fibres de carbone en fonction de l'organisme de normalisation

Une autre norme concernant les fibres de carbone existe et elle est très utilisée : il s'agit de la norme SRM 16R-94, proposée par la SACMA (Supplier of Advanced Composite Materials Association).

Comme l'illustre la table 3-10, les deux seuls protocoles permettant de déterminer les propriétés de traction des fibres de carbone sont : l'essai de traction sur mèche multifilamentaire imprégnée et l'essai de traction sur monofilament sec. Il n'existe donc aucune norme établissant les modalités d'essai de traction sur mèche multifilamentaire sèche, c'est-à-dire non-imprégnée.

Dans la littérature, la majorité des équipes menant des études sur l'endommagement des mèches de carbone au cours des procédés de transformation textile (cf. chapitre I §III. 2. a)) utilisent l'essai de traction sur mèche imprégnée comme essai de référence.

IV. 2) Protocole de traction sur mèche imprégnée

IV. 2. a) Recommandations

Le choix a été fait ici est de retenir la norme NF EN ISO 10618. En effet, il s'agit de la norme européenne, et donc la plus accessible. Celle-ci préconise que les éprouvettes soient préparées « selon toute méthode qui permette d'obtenir des éprouvettes imprégnées uniformément ».

Les procédés qui sont généralement utilisés consistent à employer un porte-bobine avec un dispositif de régulation de tension. La mèche est alors dévidée pour passer dans un bain d'imprégnation, comprenant des rouleaux d'imprégnation et des barres de tension. A la sortie du bain, d'autres rouleaux permettent d'éliminer les surplus éventuels de résine. Enfin, la mèche est enroulée sur un cadre placé à l'étuve.

La résine utilisée doit être compatible avec la fibre et son ensimage. La viscosité doit être telle qu'elle permette une imprégnation uniforme de la mèche. La déformation à rupture de la résine polymérisée doit être au moins deux fois supérieure à celle de la fibre.

Le nombre d'éprouvettes minimum recommandé est de quatre. En cas de rupture de l'éprouvette dans les mors, celle-ci doit être éliminée.

Les éprouvettes peuvent être avec ou sans talons. Les talons permettent une meilleure préhension de l'éprouvette dans les mors de l'appareil de traction. Dans le cas des éprouvettes avec talons, la norme NF EN ISO 10618 préconise une longueur utile entre talons de (150 ± 5) mm. Pour les éprouvettes sans talons, la longueur totale doit être de (250 ± 5) mm.

L'appareil de traction doit avoir une vitesse de déplacement de la traverse constante, et être équipé de dispositifs d'enregistrement de la force et de l'allongement. La norme NF EN ISO 10618 préconise également une vitesse d'essai de 250 mm.min^{-1} au maximum.

IV. 2. b) Mise en œuvre du protocole de réalisation des éprouvettes

Dans le cas présent, l'utilisation d'un bain d'imprégnation est exclue. En effet, comme évoqué précédemment, le nombre de manipulations de la mèche doit être minimisé, afin de ne pas modifier son état d'endommagement. Les phénomènes mis en jeu étant le frottement, la friction

et le rôle de la tension au cours des procédés de transformation textile, l'utilisation de rouleaux et de barres de tension lors de la réalisation des éprouvettes n'est pas envisageable.

Par conséquent, la solution retenue consiste à utiliser un gabarit teflonné, afin d'y aligner les mèches à tester, et d'y déposer la résine avant de les compresser et d'uniformiser la quantité de résine par éprouvette, comme présenté en figure 3-12.

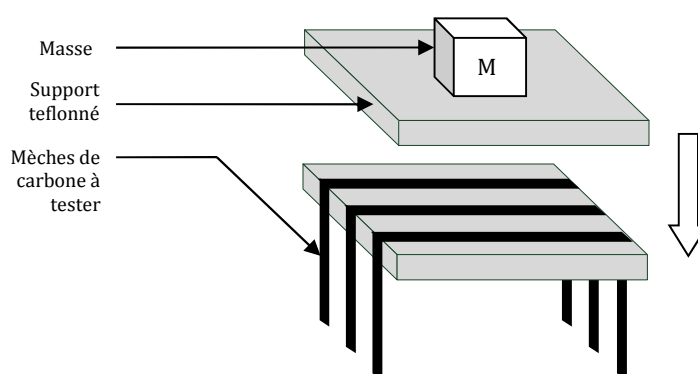


Figure 3-12 Dispositif de réalisation des éprouvettes de mèches de carbone imprégnées sans talon

Pour valider cette méthode, plusieurs éprouvettes de référence ont été réalisées avec la mèche de carbone issue de la bobine fournisseur, ici, de l'AS7 12K de chez Hexcel. La résine utilisée est une Sicomin SC SR 8100.

La vitesse d'essai est de 20 mm.min^{-1} et la longueur des éprouvettes de 250mm. Le modèle de l'extensomètre uniaxial utilisé est un MTS-2/M.

Les résultats des essais de traction menés sur 7 éprouvettes sont donnés en table 3-11.

Eprouvette n°	Force maximale N	Force à rupture N	Allongement à rupture mm	Commentaire
1	550.2	550.2	1.2	Casse au niveau du mors supérieur
2	1210.5	1210.5	2.0	Glissement puis rupture au niveau des 2 mors
3	759.0	759.0	1.6	Casse au-delà du mors supérieur
4	973.7	973.7	2.0	Glissement + fissure longitudinale
5	977.2	977.2	7.3	Casse au niveau du mors supérieur
6	959.6	959.6	4.2	Glissement
7	1798.5	1798.5	3.0	Explosion
Moyenne	1032.7	1032.7	3.0	
Ecart Type	395.3	395.3	2.1	

Table 3-11 Résultats de traction de mèches imprégnées AS7 12K

Ce tableau illustre le fait que sur 7 éprouvettes testées, 6 sont à éliminer parce qu'ayant glissé et/ou cassé dans les mors.

D'autre part, les mèches endommagées étant très « pileuses » à cause des filaments cassés, lors de l'imprégnation, la résine a tendance à remonter par capillarité le long de ces fibrilles, rendant les éprouvettes irrégulières. Ce point sera développé dans la conclusion générale de la thèse. D'ailleurs, la norme américaine SACMA SRM 16R-94 recommande d'éliminer ces portions de mèches pileuses (« Les torons qui sont frisottant, ondulés, dont la section transversale n'est pas uniforme, qui ont des grumeaux de résines ou d'autres défauts observables doivent être rejetés. » [74]) Evidemment, ici, ces portions ne peuvent être éliminées, puisque c'est précisément l'objet de cette étude.

La méthode d'essai normalisée de détermination des propriétés de traction sur mèche imprégnée n'est donc pas adaptée à l'observation de l'impact de l'endommagement sur ces mêmes propriétés.

Un protocole de traction sur mèches de carbone sèche a donc dû être mis au point.

IV. 3) Protocole de traction sur mèche sèche

IV. 3. a) Contraintes de mise en œuvre

La difficulté de tester une mèche sèche en traction réside dans le fait qu'il n'y a pas de cohésion entre les milliers de filaments qui composent la mèche. En effet, celle-ci est généralement sans torsion.

Dans le domaine du textile traditionnel, les fils sont en effet assemblés par torsion ou friction. Ainsi, lorsqu'ils sont fixés dans les mors de l'appareil de traction, toutes les fibres ou les filaments qui composent le fil travaillent. Les mors qui sont généralement utilisés pour tester ces fils sont appelés « mors en corps de chasse » (voir figure 3-13).

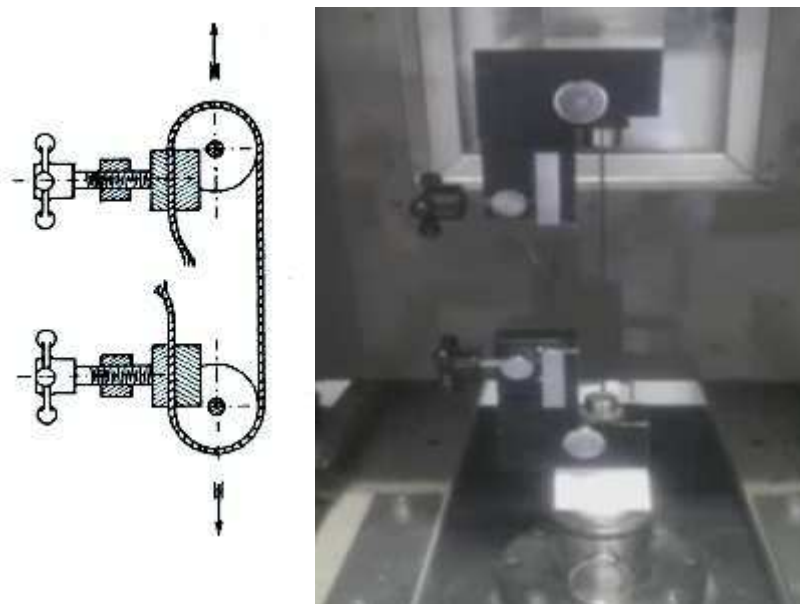


Figure 3-13 Schéma et photographie d'un montage avec mors à cabestan

Dans ce montage, le fil est enroulé autour de cylindres, afin de limiter le glissement en augmentant la surface de contact, puis serré dans des pinces plates.

Dans le cas de la mèche de carbone sans torsion, la difficulté réside dans le fait que lorsque la mèche est serrée dans les pinces plates, seuls les filaments périphériques sont figés, les filaments centraux eux, couissent lors de l'essai, et ne travaillent pas. Du fait de l'absence de cohésion entre les filaments, il y a un phénomène de glissement interfilaire au cours de l'essai.

Pour remédier à ce problème, la solution consiste à figer la mèche et l'intégralité des filaments qui la compose dans des talons dans lesquels la résine est injectée.

IV. 3. b) Protocole

IV. 3. b. (i) Réalisation des éprouvettes

Le protocole consiste à utiliser un gabarit de collage afin de placer les mèches au centre de talons métalliques. Une fois en place, les mèches sont enrésinées à l'aide d'une colle structurale, et les filaments qui la composent sont donc figés.

IV. 3. b. (ii) Gabarit de collage

Le gabarit de collage sert à optimiser le placement de la mèche de carbone, de manière à ce que celle-ci soit bien centrée, tant horizontalement que verticalement dans le talon. Pour ce faire, la partie utile, ainsi que la zone où la mèche est fixée, sont légèrement surélevées.

La longueur de jauge, ou longueur de la zone utile, est de 70 mm. De part et d'autre des talons, la mèche est fixée en prétension avec du ruban adhésif, en attendant la polymérisation de la résine.

Le gabarit permet de réaliser jusqu'à 80 éprouvettes, dont la longueur de jauge est identique. Cela augmente donc la régularité des éprouvettes et la répétabilité du procédé.

Les talons sont en aluminium. Leur section est en U et leur dimension de 8x8x1 mm (voir figure 3-14). Ils font 40mm de longueur. Du ruban adhésif double-face permet de les fixer sur le gabarit de collage (voir figure 3-15). Des repères sur le gabarit permettent de s'assurer que les talons sont bien en face les uns des autres.

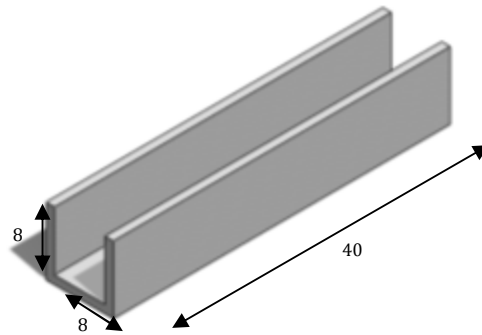


Figure 3-14 Talon en aluminium (Dimensions en mm)

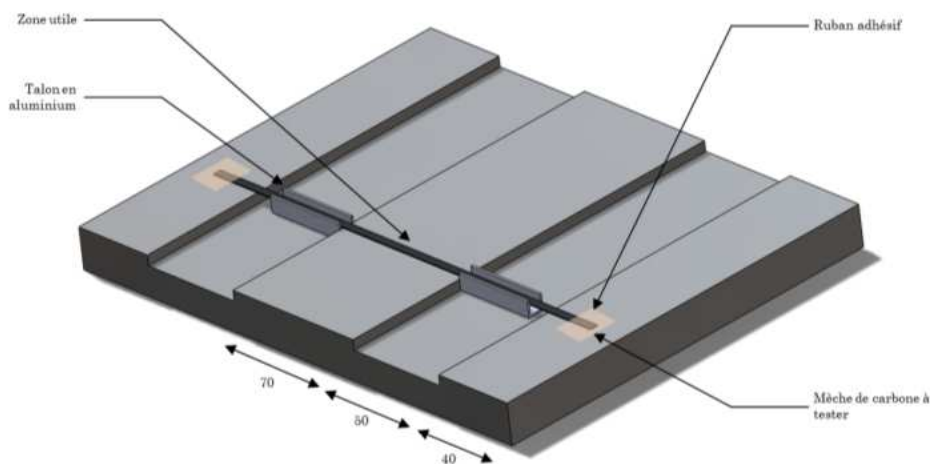


Figure 3-15 Gabarit de collage

■ Préparation de la colle

La colle qui a été utilisée est de la SCOTCH WELD™ 9323 B/A, dont la fiche technique est disponible en annexe de ce mémoire.

Cette colle a été retenue pour plusieurs raisons :

- Les deux composants sont blanc et rouge, ce qui permet de vérifier rapidement et visuellement que le mélange est prêt lorsque la couleur du mélange est bien uniforme.
- Le temps de travail est relativement étendu (2h30 pour 50 g de mélange à 23°C), ce qui est indispensable lorsque l'on réalise 80 éprouvettes en une fois.
- La colle est suffisamment visqueuse pour ne pas remonter par capillarité le long de la zone utile de la mèche (qui doit rester sèche) mais suffisamment liquide, pour être appliquée facilement à la spatule dans les talons en aluminium.
- La polymérisation peut se faire à température ambiante.

Afin que la mèche soit bien au centre du talon (figure 3-16), on remplit d'abord à moitié le talon de colle, puis on place la mèche, que l'on recouvre à nouveau de colle.

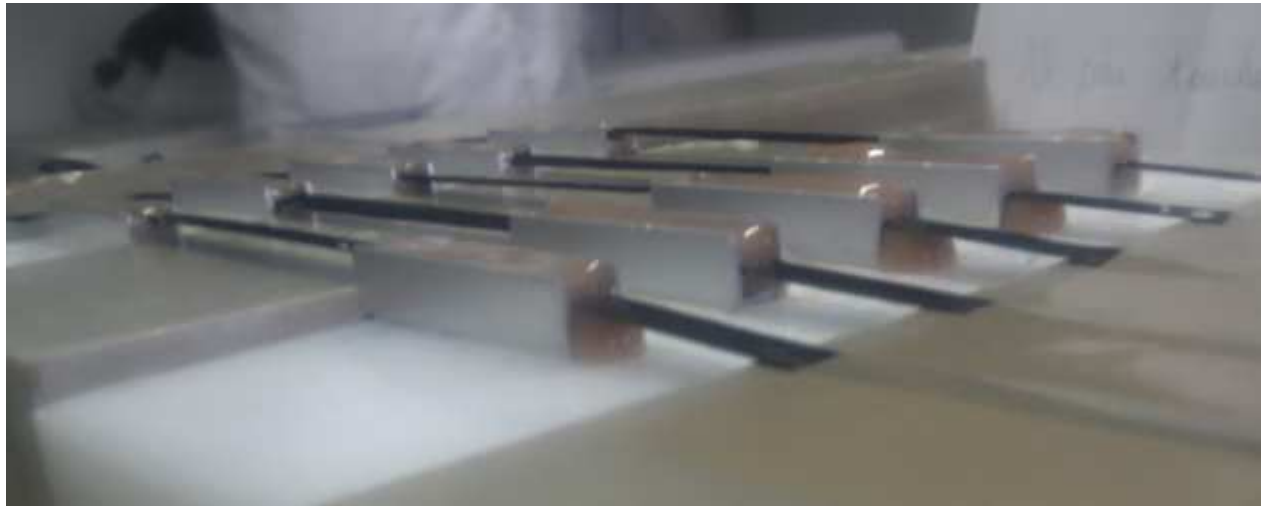


Figure 3-16 Mèches de carbone centrées

- **Référencement des échantillons**

Les éprouvettes sont étiquetées de la façon suivante :

Campagne X Lot Y Epreuve Z \Rightarrow CX LY EZ

- **Recyclage des talons**

Une fois les essais de traction réalisés, la colle est éliminée par pyrolyse (350°C pendant 3 heures) et les talons en aluminium sont récupérés.

IV. 3. b. (iii) Essai de traction

Les essais de traction sont effectués avec un extensomètre uniaxial MTS-2/M et une cellule de force de 10kN. La récupération des données se fait au moyen du logiciel TestWorks®.

Les mors utilisés sont des mors plats à serrage par vis.

IV. 3. b. (iv) Profils de résultats

Les courbes obtenues ont le profil présenté en figure 3-17.

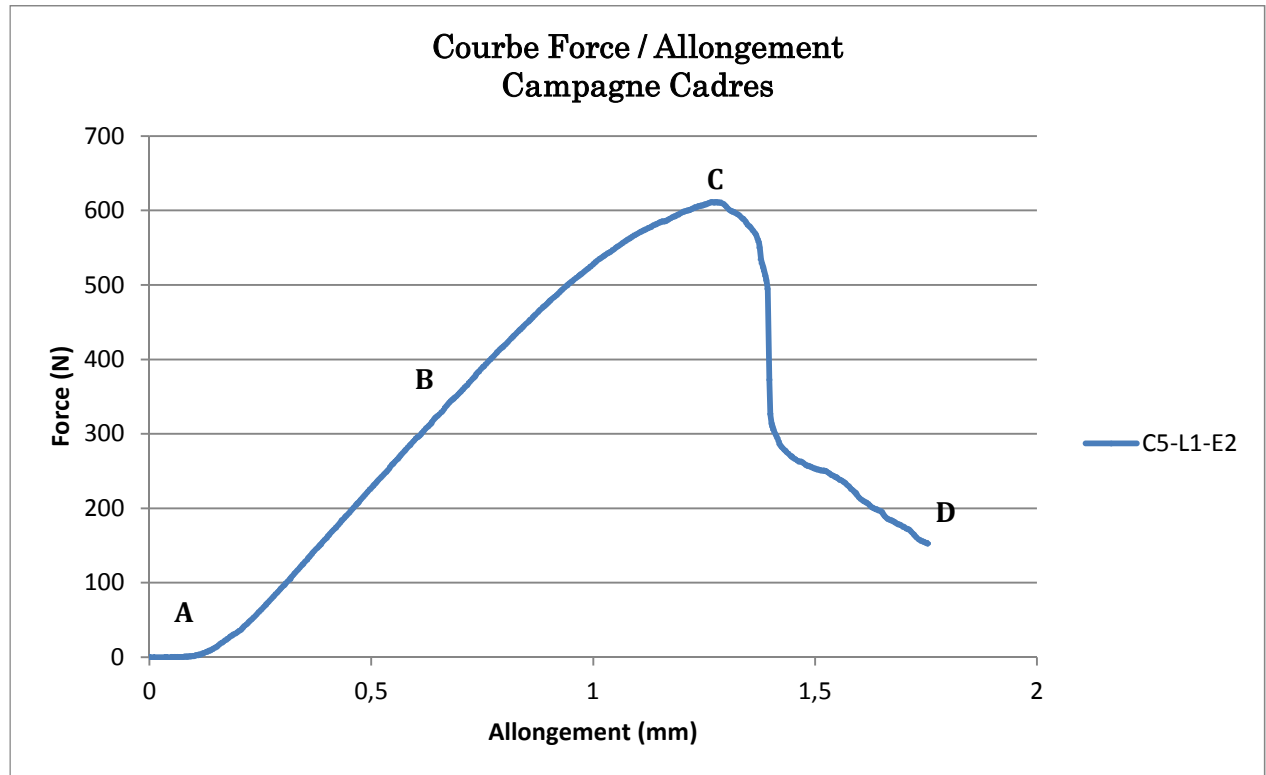


Figure 3-17 Profil type de courbe de traction « Force – Allongement » obtenue

La zone A correspond à l'allongement nécessaire pour que les filaments dont la longueur utile est égale à la longueur de jauge commencent à travailler. La zone B est la partie où la mèche a un comportement élastique linéaire. Le point C correspond à la force maximale à rupture. Puis au point D, l'éprouvette est suffisamment endommagée pour ne plus reprendre l'effort. L'essai s'arrête et la traverse revient. Dans certains cas, la totalité des fibres est cassée et l'éprouvette est alors coupée en deux.

Dans le cas présent, il s'agit de comparer uniquement des mèches de même référence et de même titre, et dont la section est supposée identique. Ceci est une approximation, puisque la section d'une mèche endommagée n'est pas régulière (comme le montrent les écarts-types de largeur apparente de corps de mèche). La longueur de jauge étant toujours la même, en première approximation, les éprouvettes seront comparées sur la base des courbes « force – allongement » et non pas « contrainte – déformation ». Ainsi, la valeur qui est retenue comme valeur de référence pour une éprouvette donnée est sa force maximale en traction. Cette approximation sera discutée dans le chapitre suivant.

Ce choix est conforté par la bibliographie [75] [76] qui montre que le module d'élasticité des fibres ne varie que très peu (moins de 5%) et qu'en revanche, la résistance en traction diminue fortement au cours du tissage.

IV. 3. c) Vérification de la normalité

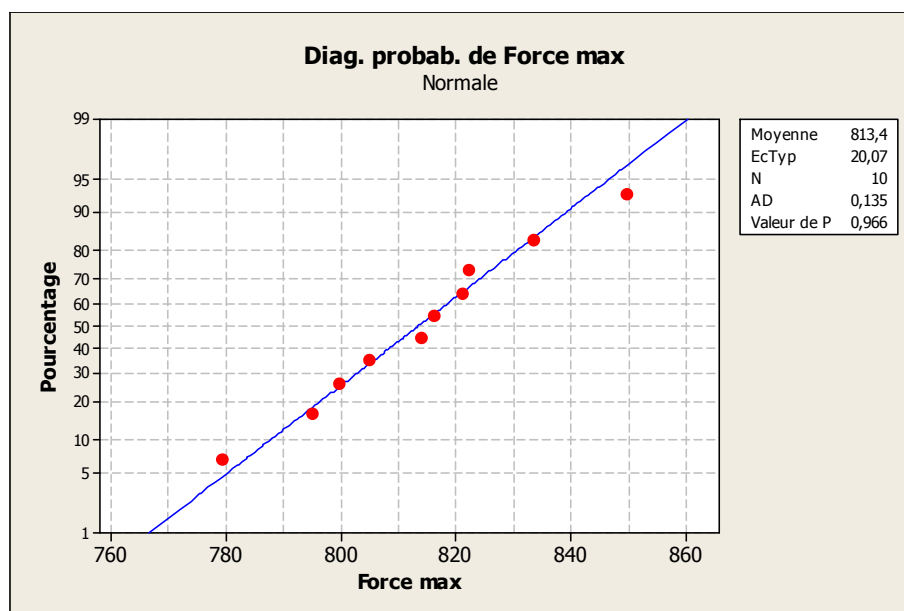
Les résultats des essais de traction réalisés avec le protocole précédent sont donnés en table 3-12.

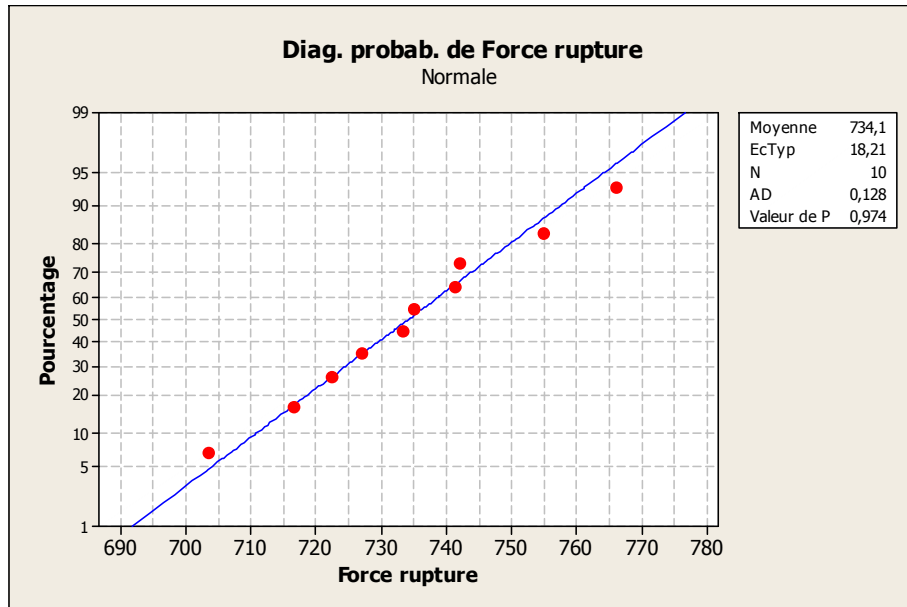
Eprouvette n°	Force maximale N	Force à rupture N	Allongement à rupture mm	Commentaire
1	821,0	741,1	1,8	RAS
2	849,5	766,0	1,3	RAS
3	833,4	754,7	1,3	RAS
4	794,9	716,6	1,4	RAS
5	822,2	741,9	1,4	RAS
6	804,7	727,0	1,2	RAS
7	779,2	703,5	1,8	RAS
8	799,5	722,3	1,7	RAS
9	813,8	733,3	1,7	RAS
10	815,9	734,9	1,5	RAS
Moyenne	813,4	734,1	1,5	
Ecart Type	20,1	18,2	0,2	

Table 3-12 Résultats des essais de traction sur mèche sèche avec talons en aluminium

Avec ce protocole, aucune des 10 éprouvettes testées n'est éliminée. Aucun glissement, ni aucune rupture au niveau des talons n'est observé.

Par ailleurs, ces résultats répondent à une loi normale, comme le montrent les graphiques de la figure 3-18. En effet, la plupart des tests statistiques qui seront opérés par la suite requièrent que la série de mesures suive une loi normale.





(b)

Figure 3-18 Diagrammes de probabilité pour (a) la force maximale et (b) la force à rupture des mèches de carbone sèches avec talon en aluminium

Le test qui a été utilisé ici est le test d'Anderson-Darling. Il a pour avantage de détecter efficacement l'écart par rapport à la normalité des valeurs minimales et maximales d'une population [77]. La grandeur calculée est une distance au carré qui donne plus d'importance aux valeurs de queue de la population. Un coefficient d'Anderson-Darling petit indique que les valeurs suivent bien une loi normale.

La valeur d'Anderson-Darling est définie par [78] :

$$AD^2 = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i-1) [\ln(F_i) + \ln(1 - F_{n-i+1})] \quad (3.11)$$

Avec n la taille de la population

Et F_i la fréquence théorique de la loi de répartition normale centrée et réduite associée à la valeur standardisée $z_{(i)} = \frac{x_{(i)} - \bar{x}}{s}$

Nous observons sur la figure 3-18 (a) et (b) que les points de données sont relativement proches de la ligne de référence, ce qui nous indique que la distribution suit bien une loi normale.

Conclusion du chapitre III

Dans ce chapitre, nous avons présenté les protocoles qui ont été mis en place pour caractériser l'état morphologique mais aussi mécanique de la mèche de carbone sèche.

Pour permettre la caractérisation morphologique de la mèche de carbone dégradée, des critères de l'endommagement ont été préalablement définis. Pour cela, une comparaison entre l'aspect morphologique d'une mèche saine et d'une mèche dégradée a été réalisée.

Un protocole d'acquisition d'image, basé sur l'utilisation d'un scanner de documents a été mis en place afin de permettre l'obtention d'images bidimensionnelles de la mèche de carbone. Un protocole de traitement et d'analyse quantitative d'images permet ensuite de récupérer plusieurs indicateurs de la dégradation : le nombre total de pixels correspondant au carbone, le nombre de pixels correspondant au corps de mèche, par soustraction le nombre de pixels correspondant au carbone hors corps de mèche, et enfin les largeurs du corps de la mèche tout au long de celle-ci.

Un des objectifs des essais qui ont été menés, et dont les résultats seront présentés au chapitre suivant, est de valider le choix de ces grandeurs morphologiques comme indicateurs de l'endommagement de la mèche de carbone. La méthode qui a été choisie pour parvenir à cette validation est de corréliser ces résultats morphologiques avec des résultats mécaniques, obtenus par une méthode de caractérisation destructive : l'essai de traction. L'hypothèse qui a été faite est que lorsque les critères de l'endommagement de la mèche sont validés, ses propriétés en traction se dégradent. Par exemple, lorsque des filaments sont rompus, la quantité de filaments sollicités lors de l'essai de traction diminue, et la force maximale en traction diminue également. De même, lorsque les filaments sont désalignés (des filaments sont en sur-longueur localement par exemple, et forment des boucles, comme sur la figure 3-19), alors, l'ensemble des filaments de la mèche n'est plus en équitension, et seuls les filaments alignés avec le corps de la mèche travaillent.

Pour ce faire, un protocole d'essai de traction a été développé pour caractériser les propriétés en traction de la mèche de carbone sèche. En effet, les résultats obtenus sur des mèches imprégnées ont montré que ces essais ne permettaient pas de caractériser l'endommagement de la mèche. Plusieurs méthodes ont été testées avant d'aboutir à un protocole robuste et répétable. Ce dernier permet de recueillir des informations sur la force maximale à rupture de la mèche (N), son allongement à rupture (mm), et par approximation son module (GPa).



Figure 3-19 Mèche de carbone avec filaments désalignés

Dans le chapitre suivant seront présentés les résultats obtenus par application de ces protocoles de caractérisation morphologique et mécanique. Une étude de corrélation sera ensuite détaillée afin de valider ou non la méthode morphologique comme outil de caractérisation pour l'endommagement de la mèche de carbone.

Chapitre IV – Caractérisation mécanique et morphologique par campagne

Un banc de test permettant de recréer expérimentalement les conditions opératoires du procédé de tissage a été mis au point. Il a permis de dégrader sur mesure des mèches de carbone selon les paramètres identifiés au chapitre 2.

Dans le chapitre précédent, les critères de l'endommagement engendré ont été définis, au sens mécanique, mais également au sens morphologique. Un protocole d'acquisition et d'analyse d'images a été mis au point dans le but d'évaluer les indicateurs morphologiques de l'endommagement, suivant les critères précédemment identifiés. Afin de mesurer les indicateurs mécaniques, un protocole de caractérisation par essai de traction sur mèche sèche a également été développé.

Dans ce chapitre sont présentés les indicateurs, ainsi que les volumes et précisions de mesure retenus pour chaque méthode de caractérisation.

Par la suite sont présentés les résultats des caractérisations pour chaque campagne du plan d'expérience. Une étude d'influence des différents paramètres sur les indicateurs mécaniques et morphologiques est alors proposée en fin de chapitre.

PLAN DU CHAPITRE

I)	CHOIX D'UN VOLUME DE MESURE	127
I. 1)	Caractérisation mécanique	127
I. 2)	Caractérisation morphologique	130
I. 3)	Conclusion	131
II)	RESULTATS PAR CAMPAGNE	132
II. 1)	Campagne 1 : Guide-fils	132
II. 2)	Campagne 2 : Cinématique	138
II. 3)	Campagne 3 : Matière – Enimage.....	144
II. 4)	Campagne 4 : Matière – Titre.....	149
II. 5)	Campagne 5 : Cadres.....	153
II. 6)	Campagne 6 : Peigne	158
III)	CAMPAGNE CUMULEE	164
	CONCLUSION DU CHAPITRE IV	167

I) Choix d'un volume de mesure

I. 1) Caractérisation mécanique

I. 1. a) Objet d'étude

L'objet étudié est une mèche multi-filamentaire. A l'exception de la campagne « Titre », toutes les mèches testées sont de titre 12K, c'est-à-dire comptant approximativement 12 000 filaments en section. En table 4-1 sont présentées les données fournisseur associées à cette mèche, et en table 4-2 les valeurs de référence obtenues en appliquant le protocole de traction sur mèche sèche présenté au chapitre précédent. Une explication de l'écart observé entre les données fournisseur et les données obtenues expérimentalement sera proposée dans la suite du chapitre.

Résistance en traction	4830	MPa
Module en traction	241	GPa
Allongement à rupture	1,8	%
Densité	1,79	g/cm ³
Masse surfacique	0,800	g/m ²
Surface en section de la mèche	0,45	mm ²
Diamètre du filament	6,9	µm

Table 4-1 Données fournisseur sur la mèche testée

	Force maximale N	Force à rupture N	Module en traction GPa	Allongement à rupture %
Moyenne	773,4	697,8	134,1	2,0
Ecart-type	60,3	54,7	15,7	0,3

Table 4-2 Valeurs de référence pour une population de 20 éprouvettes testées suivant le protocole de traction retenu

Les courbes de traction associées aux éprouvettes de référence testées sont présentées en figure 4-1. La mèche théorique représentée sur cette même figure est basée sur les données fournisseur. Elle est calculée en se basant sur les valeurs de module en traction, résistance en traction et allongement à rupture, fournis en table 4-1 pour un monofilament, et en les extrapolant à une mèche théoriquement constituée de 12 000 monofilaments.

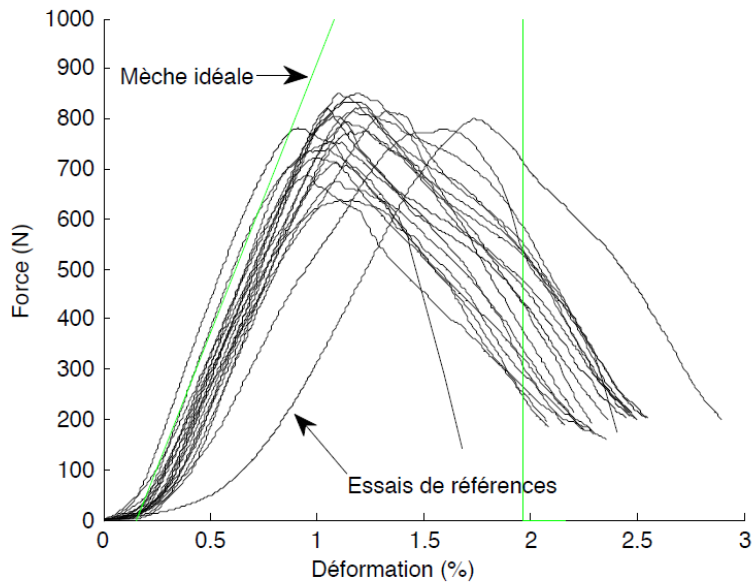


Figure 4-1 Courbes de traction de 20 éprouvettes de référence

I. 1. b) Volume de mesure

Le choix d'un volume de mesure dépend directement de la distribution des défauts dans la mèche. Chudoba *et al.* [79] ont montré que le comportement de la mèche était directement lié au rapport de taille entre la longueur de jauge de l'éprouvette et la taille des défauts, comme représenté en figure 4-2. Dans le cas de petites longueurs de jauge, la moindre petite irrégularité, telle qu'une variation de la longueur des filaments, ou des contraintes d'activation des défauts, ont un poids important sur le comportement de la mèche en traction. A l'inverse, dans le cas d'éprouvettes à grande longueur de jauge, le comportement de la mèche est régi par la dispersion des résistances des filaments le long de la mèche. La longueur de jauge a alors un impact direct sur la réponse statistique du comportement de la mèche. Une manière d'appréhender la dispersion de comportement des filaments est de mener de larges campagnes de tests de traction sur monofilament. Cependant, ces essais s'avèrent fastidieux et difficilement reproductibles.

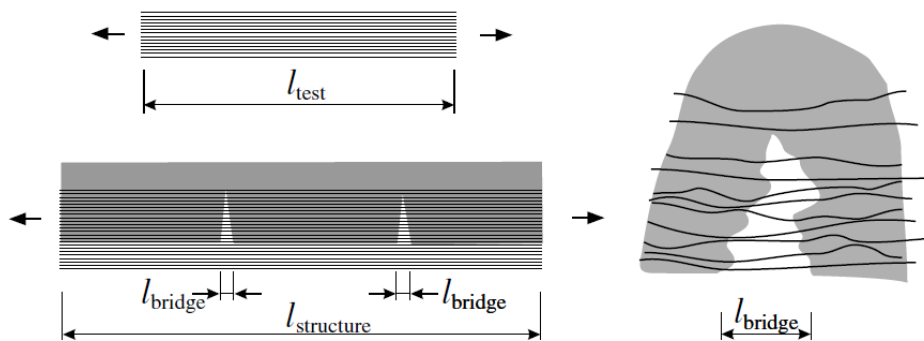


Figure 4-2 Petite longueur de jauge et grande longueur de jauge vis-à-vis de la taille de la fissure

Chudoba *et al.* [79] ont réalisé plusieurs essais de traction sur mèches multi-filamentaires de verre, en variant la longueur de jauge. Ils ont montré que la longueur de jauge n'avait pas ou très peu d'influence sur les résultats des essais de traction au regard d'autres paramètres plus influents, tels que le profil de la résine dans les talons et sa déformation, comme le montre la figure 4-3.

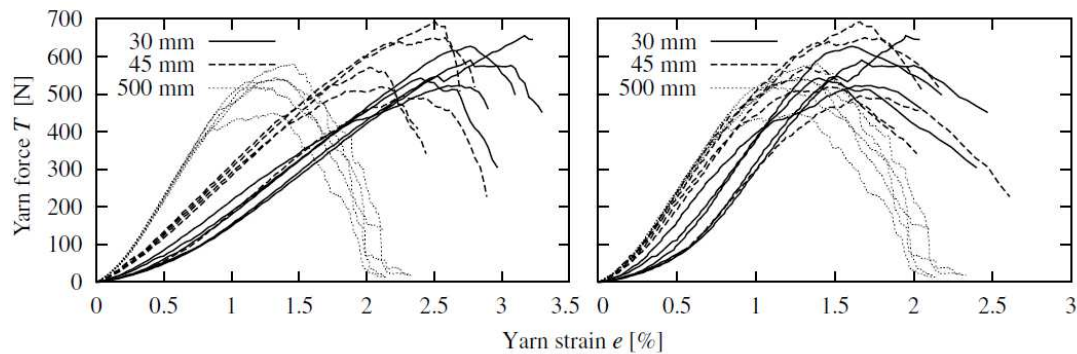


Figure 4-3 Tests de traction sur multi-filamentaires de verre avec différentes longueurs de jauge.
A gauche : données brutes. A droites : données corrigées en éliminant la déformation due aux talons époxy [79]

Ces essais valident le choix d'une longueur de jauge de 70mm, celle-ci étant en outre une valeur intermédiaire entre les petites longueurs de jauge (30mm et 45mm) et les grandes valeurs de jauge (500mm) de Chudoba *et al.* [79].

I. 1. c) Choix des indicateurs

Les essais menés sur une population de référence (voir table 4-2) montrent un écart important entre les valeurs mesurées et les valeurs annoncées par le fournisseur. Cela s'explique en grande partie par le fait que les conditions de caractérisation sont très différentes. En effet, les protocoles utilisés par les fournisseurs reposent principalement sur des essais de traction sur mèche imprégnée. D'autre part, plusieurs facteurs peuvent également expliquer les valeurs plus basses observées dans le cas de notre protocole de traction sur mèche sèche, à savoir :

- La désorientation des filaments, qui conduit à une sur-longueur de ces derniers,
- La distribution de longueur des filaments,
- La déformation de la résine qui constitue les talons,
- La modification de la section de la mèche au cours de l'essai.

Dans le cadre de l'endommagement entraînant une rupture de filaments, l'indicateur mécanique le plus pertinent semble être la résistance à rupture. En effet, l'hypothèse qui est faite ici est que plus le nombre de filaments rompus est élevé, plus la résistance à rupture est faible. Nous verrons par la suite si cette hypothèse peut être validée ou non.

I. 1. d) Précision de mesure

Comme expliqué dans le chapitre précédent, il n'existe pas de norme sur le protocole de traction sur mèche multi-filamentaire sèche. Ainsi, il n'existe pas de « bonnes pratiques » sur un tel essai. Autant les résultats sur mèche saine offrent relativement peu de dispersion (voir table 4-2), autant les essais sur mèche endommagée sont beaucoup moins répétables. En effet, comme nous

le verrons par la suite, l'endommagement lié au processus de dégradation sur mesure entraîne une désorientation des filaments, ainsi que des ruptures aléatoires de filaments, exacerbant le caractère dispersif lié aux propriétés mécaniques de la mèche. Ainsi, comme le montre la table 4-3, pour la force à rupture, la différence de coefficient de variation pour la force à rupture entre le lot de référence et un lot de mèche endommagée peut aller jusqu'à 40%.

	Force maximale			Force à rupture			Allongement à rupture		
	(N)			(N)			(mm)		
	Moyenne	Ecart-type	CV	Moyenne	Ecart-type	CV	Moyenne	Ecart-type	CV
REF	773,405	60,2	8%	697,76	54,7	8%	1,415	0,22	16%
C2-L3	437,1	162,2	37%	401,4	152,2	38%	1,1	0,2	18%

Table 4-3 Dispersion comparée entre le lot de référence et le lot de mèches endommagées

I. 2) Caractérisation morphologique

I. 2. a) Objet d'étude

L'objet qui est ici étudié est la mèche endommagée, selon les critères définis dans le chapitre précédent. Elle est définie par un ensemble de filaments, continus ou discontinus, sous tension variable.

La technique d'acquisition d'images bidimensionnelles qui a été retenue fournit une vision surfacique de la mèche. Seuls les filaments à la surface de la mèche, ainsi que ceux hors de la mèche, sont visibles. Aucune information ne peut être recueillie sur l'état des filaments au cœur de mèche. En effet, l'hypothèse qui est a été faite ici, est que l'endommagement étant ici principalement dû à des phénomènes de frottement avec des éléments extérieurs, ce sont les filaments à la surface de la mèche qui sont principalement impactés, les filaments au cœur de la mèche étant eux relativement protégés.

I. 2. b) Volume de mesure

Afin de pouvoir statuer sur la relation entre les indicateurs mécaniques et morphologiques, le volume de la mesure morphologique a été choisi en relation avec la longueur de jauge retenue pour les essais mécaniques. Compte-tenu de la résolution de la mesure, la population d'échantillons doit représenter au minimum l'équivalent de 3 éprouvettes mécaniques de longueur de jauge 70mm.

Les mèches caractérisées ont une longueur de 300mm, ce qui représente une longueur d'un peu plus de 4 éprouvettes mécaniques.

I. 2. c) Choix des indicateurs

Dans le chapitre précédent, plusieurs critères de l'endommagement ont été définis, à savoir :

- La quantité de filaments cassés à une extrémité, mais maintenus en cohésion avec le corps de la mèche,
- La variation de diamètre/largeur apparente du corps de la mèche,

- La désorientation des filaments en cohésion avec le corps de la mèche,
- La quantité de filaments cassés, totalement sortis du corps de la mèche.

Les techniques de mesure ont également été présentées. Malheureusement, la technique d'acquisition d'images n'a pas permis de mesurer la désorientation des filaments pour l'ensemble des lots des différentes campagnes. En effet, en raison de l'endommagement, certaines zones du corps de mèche se retrouvent dans l'ombre de certains filaments.

Par conséquent, les indicateurs qui ont été retenus sont :

- L'indicateur de surface carbone, qui représente le nombre total de pixels carbone de l'image ;
- L'indicateur de surface de mèche, qui représente le nombre de pixels carbone appartenant au corps de la mèche, selon le critère de voisinage défini au chapitre précédent ;
- L'indicateur de surface de filaments rompus, qui représente la quantité de pixels appartenant à des pixels de carbone hors-mèche ;
- L'indicateur de largeur de mèche, qui permet de comparer les largeurs apparentes du corps de mèche, et ainsi, en faisant l'approximation que l'épaisseur des mèches est semblable (les deux vitres du scanner étant supposées à même distance), permet de comparer les sections surfaciques des mèches testées. En effet, dans la littérature, les paramètres qui sont utilisés pour décrire morphologiquement une mèche, pour la modélisation CAO de structures tissées par exemple, sont le diamètre du filament, et la section surfacique de la mèche [80].

I. 2. d) Précision de la mesure

La résolution du matériel d'acquisition utilisé est de 3200 pixels par pouce pour toutes les images. Cela correspond à 125 pixels par millimètre soit 1 pixel représentant 8,0 μm .

Or, le diamètre des filaments étudiés est de 6,9 μm (voir table 4-1). Par conséquent, la résolution du matériel ne permet pas de descendre finement à l'échelle du filament. Cependant, l'écart de 16% entre les deux grandeurs est suffisamment faible pour permettre de conclure.

I. 3) Conclusion

Que ce soit pour la caractérisation mécanique ou morphologique, l'objet d'étude est la mèche de carbone multi-filamentaire. Suivant le type de caractérisation, les critères de l'endommagement varient (voir figure 4-4).

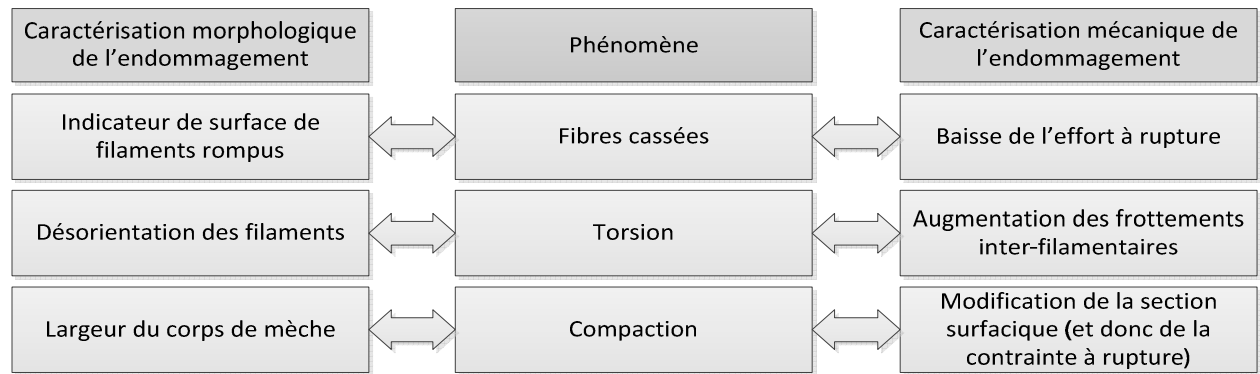


Figure 4-4 Critères de l'endommagement suivant le mode de caractérisation

Une longueur de jauge de 70 mm, jugée comme intermédiaire, d'après les normes sur les essais de traction sur mèches sèches, et la littérature, a été choisie pour la caractérisation mécanique. Pour chaque lot du plan d'expérience, 10 éprouvettes de traction sont testées. Afin d'avoir un volume de mesure équivalent, les acquisitions d'images représentent 300 mm de mèche, ce qui correspond à un peu plus de 4 éprouvettes mécaniques. Dans le paragraphe suivant sont donnés les résultats associés aux critères décrits précédemment pour chaque campagne.

II) Résultats par campagne

Pour chaque campagne de test (cf. chapitre II §III. 3), différentes configurations, imposées par le plan d'expérience fractionnaire ont été testées.

Chacune de ces configurations constituent un lot. Chaque lot est composé de dix éprouvettes. Ces éprouvettes ont dans un premier temps été scannées puis analysées morphologiquement (cf. chapitre III §II). Dans un second temps, elles ont été testées en traction, selon le protocole décrit dans le chapitre précédent (cf. chapitre III §III.3).

Les résultats issus des essais mécaniques des différents lots ont été testés pour vérifier le caractère normal de leur distribution statistique, indispensable à l'utilisation de la plupart des tests statistiques. Ces tests de normalité permettent éventuellement d'écarter certains points aberrants.

Dans cette partie sont présentés les résultats de la caractérisation mécanique et morphologique. Une résolution du plan d'expérience associé à chaque campagne est proposée.

II. 1) Campagne 1 : Guide-fils

Pour rappel, dans cette campagne, les différents facteurs testés étaient :

- le matériau de l'œillet,
- sa géométrie,
- l'angle d'attaque entre la mèche et l'œillet,
- le nombre de passage de la mèche à travers l'œillet.

Les niveaux associés à chaque facteur sont donnés en table 4-4.

La table 4-5 indique les différentes configurations à tester, générées par le logiciel de traitement statistique, d'après le plan d'expérience fractionnaire qui a été retenu.

Paramètres	Nb de niveaux	Valeurs des paramètres
Matériaux	2	Alumine polie
		Titanate d'aluminium
Géométrie	2	R1 (Ø5mm)
		R2 (Ø10mm)
Angle d'attaque	2	90°
		0°
Nombre de cycles	2	1 cycle
		10 cycles
Vitesse	F	
Tension	F	
Matière	F	

Table 4-4 Facteurs et niveaux de la campagne 1 : « Guide fils »

Lot n°	Matériaux	Géométrie	Angle attaque	Nombre de cycles
1	Alumine	R1	90°	1
2	Alumine	R2	90°	10
3	Titanate	R2	90°	1
4	Titanate	R1	90°	10
5	Alumine	R2	0°	1
6	Titanate	R2	0°	10
7	Titanate	R1	0°	1
8	Alumine	R1	0°	10

Table 4-5 Configurations générées par le plan d'expérience fractionnaire pour la campagne 1 : « Guide-Fils »

II. 1. a) Résultats des tests de traction

Les résultats moyennés par lot, sont donnés en table 4-6.

	Nombre d'éprouvettes	Force maximale		Force à rupture		Allongement à rupture		Module en traction	
		(N)		(N)		(mm)		(Mpa)	
		Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
Lot1	10	627,8	164,3	572,4	152,3	1,6	0,3	4,93E+04	3,33E+04
Lot2	10	461,7	68,9	417,8	63,2	1,3	0,2	5,95E+04	2,89E+04
Lot3	10	556,8	113,4	504,6	102,7	1,2	0,2	7,64E+04	3,30E+04
Lot4	10	803,5	38,3	737,3	36,7	1,4	0,2	8,74E+04	4,62E+04
Lot5	10	860	97,5	777,6	88	1,5	0,2	1,02E+05	3,24E+04
Lot6	10	897,7	121,9	806,4	101,2	1,6	0,2	1,20E+05	1,73E+04
Lot7	10	821,8	133,9	743,6	118,4	1,4	0,2	8,64E+04	5,05E+04
Lot8	10	953,7	102	881,5	109,3	1,4	0,1	1,05E+05	3,12E+04

Table 4-6 Résultats moyennés par lots et écarts-types des essais de traction de la campagne 1 : « Guide-fils »

Nous remarquons que les écart-types sont relativement importants (de 4,8% à 26,2% et jusqu'à 68% pour le module). Cela est tout d'abord dû au fait que les tailles de population sont relativement petites, mais tient aussi à l'incertitude de la mesure. En effet, les essais sur mèches sèches comportent de nombreuses sources d'erreur, qui seront détaillés dans le paragraphe suivant.

▪ Résolution du plan d'expérience mécanique

Les résultats de l'analyse du plan d'expérience associé à la campagne « Guide-Fils » sont résumés en table 4-7.

Prédicteur	Coeff	P
Constante	742,29	0,000
Matériaux	-16,51	0,267
Géométrie	57,04	0,000
Angle attaque	-132,93	0,000
Nombre de cycles	-26,42	0,077
S = 127,261 R carré = 59,2 %		

Table 4-7 Résultats de l'analyse du plan d'expérience associé à la campagne 1 : « Guide-Fils »

Nous observons que les effets les plus importants sont ceux de l'angle d'attaque et de la géométrie (diamètre de l'œillet). Seul le paramètre « matériaux » n'est pas statistiquement significatif.

L'équation de régression obtenue est la suivante :

$$\text{Force max}(N) = 742 - 16,5 \times \text{Matériaux} + 57,0 \times \text{Géométrie} - 133 \times \text{Angle d'attaque} - 26,4 \times \text{Nombre de cycles}$$

▪ Identification des tendances

Sur le graphique des effets principaux, donné en figure 4-5, nous constatons que le paramètre « matériaux » n'a pas une grande influence sur la moyenne de la force maximale. Certes l'utilisation d'un œillet en titanate d'aluminium, matériau plus onéreux, et recommandé pour la fibre de carbone, plutôt qu'en en alumine polie, qui est un matériau plus commun et bon marché, permet une légère conservation des propriétés mécaniques de la mèche, mais la différence n'est pas significative.

De même, dans cet exemple, le nombre de cycles n'apparaît pas comme un facteur lourdement influent. La mèche de carbone qui est passée 10 fois à travers l'œillet a de moins bonnes propriétés mécaniques que celle qui n'y est passée qu'une fois, mais là encore, la différence n'est pas significative.

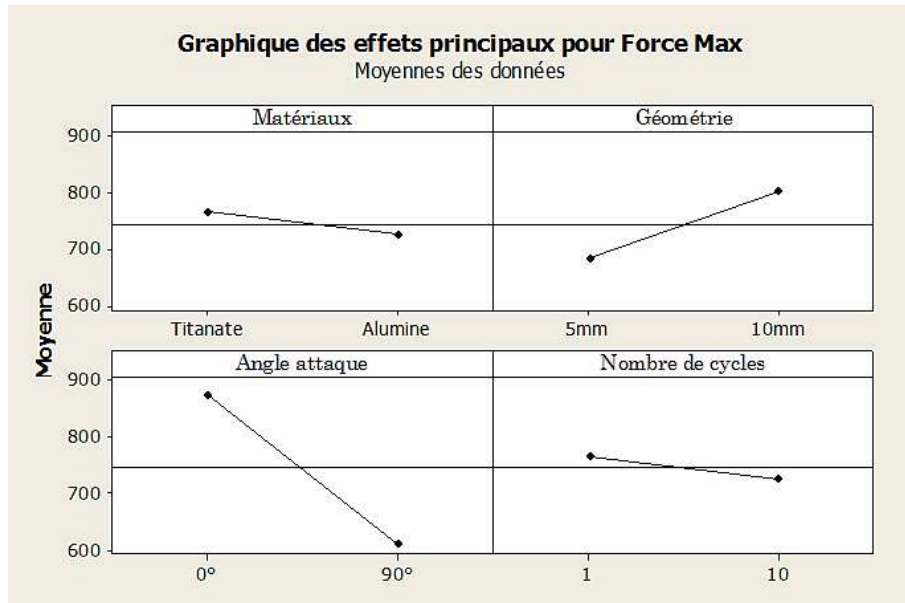


Figure 4-5 Graphique des effets principaux pour la force max (N) - Campagne 1 : « Guide-Fils »

Au contraire, la géométrie et l'angle d'attaque ont quant à eux un impact important sur les propriétés mécaniques de la mèche. En effet, le passage d'un angle de 0° (angle d'attaque nul) à un angle d'attaque de 90° (la mèche forme un angle droit au passage de l'œillet) est responsable d'une chute de 264 N en moyenne de la force maximale. De même, le rétrécissement du diamètre de l'œillet est responsable à lui seul d'une chute de la force maximale de 117 N.

Le diagramme des interactions est donné en figure 4-6. Nous constatons qu'il n'y a pas d'interaction significative entre le matériau et la géométrie de l'œillet, de même qu'entre l'angle d'attaque et le nombre de cycles. L'interaction la plus significative a lieu entre la géométrie et le nombre de cycles.

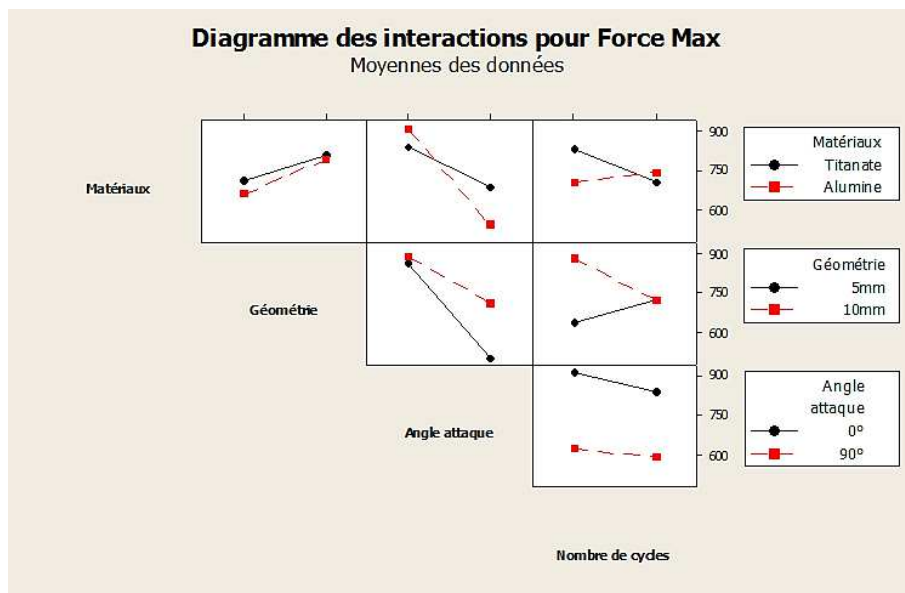


Figure 4-6 Diagramme des interactions pour force max (N) - Campagne 1 : « Guide-Fils »

II. 1. b) Résultats des essais morphologiques

Pour chaque lot, une éprouvette de mèche a été analysée par traitement d'images selon le protocole décrit dans le chapitre précédent. Les résultats sont donnés en table 4-8.

Numéro de lot	Matériaux	Géo-métrie	Angle attaque	Nombre de cycles	Indicateur surface carbone	Indicateur surface mèche	Indicateur surface de filaments rompus	Largeur mèche (mm)	
								Moyenne	Ecart type
Lot 1	Alumine	R1	90°	1	$2,50 \cdot 10^7$	$2,50 \cdot 10^7$	124	5,42	0,23
Lot 2	Alumine	R2	90°	10	$1,23 \cdot 10^7$	$1,23 \cdot 10^7$	6 855	2,92	0,52
Lot 3	Titanate	R2	90°	1	$1,42 \cdot 10^7$	$1,42 \cdot 10^7$	176	2,97	0,25
Lot 4	Titanate	R1	90°	10	$1,17 \cdot 10^7$	$1,17 \cdot 10^7$	6 414	2,64	0,55
Lot 5	Alumine	R2	0°	1	$2,14 \cdot 10^7$	$2,14 \cdot 10^7$	109	4,57	0,28
Lot 6	Titanate	R2	0°	10	$9,99 \cdot 10^6$	$9,99 \cdot 10^6$	458	3,02	0,69
Lot 7	Titanate	R1	0°	1	$9,82 \cdot 10^6$	$9,82 \cdot 10^6$	166	2,13	0,22
Lot 8	Alumine	R1	0°	10	$7,01 \cdot 10^6$	$7,01 \cdot 10^6$	194	1,52	0,19

Table 4-8 Résultats morphologiques – Campagne 1 : « Guide-Fils »

■ Identification des tendances

Les graphiques des effets principaux sont donnés en figure 4-7.

Nous remarquons que la surface de carbone « mèche » et la largeur de la mèche évoluent proportionnellement. Cela est cohérent puisque la longueur de l'éprouvette est constante, ainsi, lorsque la largeur, ou diamètre apparent, de la mèche diminue, la surface de carbone « mèche » est moins importante. Par conséquent, par la suite, seule la largeur de la mèche (moyennée) sera étudiée.

La largeur de la mèche est maximale pour un œillet en alumine, de géométrie R2, soit le plus grand des deux diamètres, un angle d'attaque de 90° et un cycle. Ces résultats sont partiellement cohérents avec ceux de la caractérisation mécanique. En effet, pour la géométrie et le nombre de cycles, les tendances sont les mêmes : lorsque le rayon est petit, la mèche est davantage endommagée (sa force à rupture est plus faible), son diamètre apparent diminue ; de même, lorsque le nombre de cycles augmente. Cependant, la tendance est inversée pour le matériau et l'angle : plus la matière est dégradée (sa force à rupture diminue), plus la largeur de la mèche est importante. Cela s'explique peut-être par le fait que lors du processus de dégradation, la mèche a tendance à s'étaler contre l'œillet. La moyenne de la largeur de la mèche n'est donc pas une grandeur discriminante de l'endommagement de la mèche, du moins pour cette campagne.

L'écart-type de la largeur de la mèche, qui est vu ici comme une mesure de la dispersion de la largeur de la mèche, est maximal pour un œillet en titanate, le plus grand des deux diamètres, un angle d'attaque de 90° et 10 cycles. Là encore, ces résultats sont partiellement cohérents avec les résultats de la caractérisation mécanique. En effet, l'écart-type de la largeur de la mèche a été considéré comme un critère discriminant de l'endommagement de la mèche dans le sens où plus la mèche est dégradée, plus sa section est variable. L'écart-type des diamètres apparents de la mèche devrait donc augmenter quand l'endommagement de la mèche augmente. Or ici, on constate que cela est vrai pour l'angle d'attaque et le nombre de cycles, mais pas pour le matériau et la géométrie. L'écart-type des diamètres apparents de la mèche ne semble donc pas être une grandeur discriminante de l'endommagement pour cette campagne.

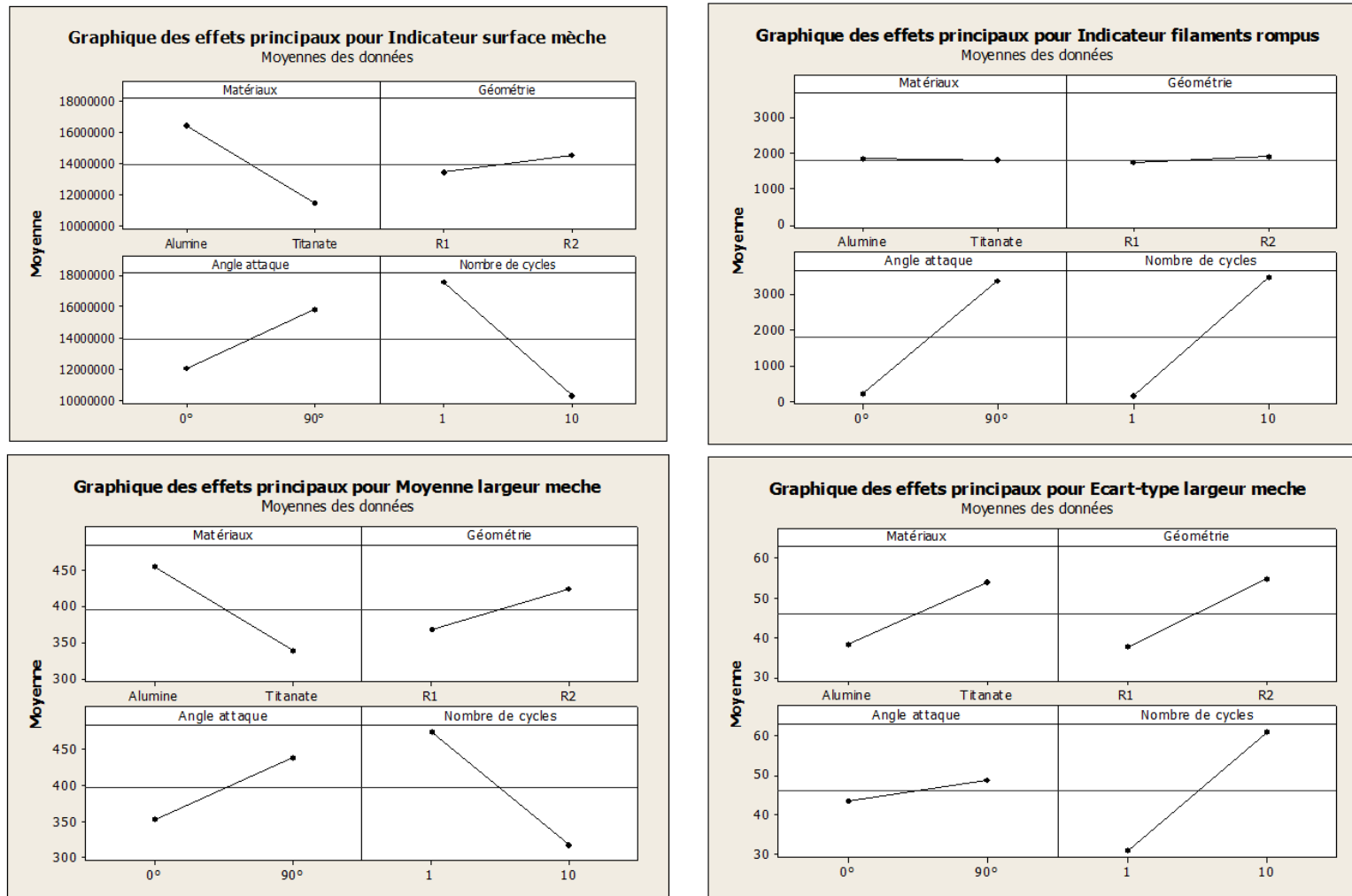


Figure 4-7 Graphiques des effets principaux sur résultats morphologiques – Campagne 1 : « Guide-fils »

Enfin, l'effet du matériau et de la géométrie de l'œillet n'a quasiment aucun impact sur la quantité de filaments apparemment rompus. A l'inverse, l'influence de l'angle d'attaque et du nombre de cycles sur cette grandeur morphologique est très prononcée : plus la mèche est endommagée mécaniquement, plus la quantité de filaments apparemment rompus augmente. Il semblerait donc que cette grandeur soit discriminante de l'endommagement de la mèche pour cette campagne.

▪ Résolution du plan d'expérience

Les équations de régression qui relient les indicateurs morphologiques aux différents facteurs sont les suivantes :

Indicateur de filaments rompus

$$= 1812 + 9 \times \text{Matériaux} - 87 \times \text{Géométrie} + 1580 \times \text{Angle d'attaque} - 1668 \times \text{Nombre de cycles}$$

Indicateur de largeur mèche moyenne

$$= 396 + 58 \times \text{Matériaux} - 28 \times \text{Géométrie} + 43 \times \text{Angle d'attaque} + 79 \times \text{Nombre de cycles}$$

Indicateur écart – type largeur mèche

$$= 46 - 8 \times \text{Matériaux} - 9 \times \text{Géométrie} + 3 \times \text{Angle d'attaque} - \times \text{Nombre de cycles}$$

II. 1. c) Conclusions de la campagne « guide-fils »

La campagne menée sur les œillets, et les guide-fils en général, a montré que les paramètres les plus influents sur les propriétés mécaniques de la mèche étaient la géométrie de l'œillet et l'angle d'attaque de la mèche sur l'œillet. Le matériau utilisé ainsi que le nombre de cycles n'ont pas été identifiés comme significativement influents sur les propriétés mécaniques de la mèche. Pour ce qui est des propriétés morphologiques, le nombre de cycles, c'est-à-dire le nombre de passages de la mèche à travers l'œillet s'est révélé être un critère très influent sur la quantité de filaments apparemment rompus.

Une des perspectives à cette campagne serait de tester un troisième point à 100 cycles pour le facteur « nombre de cycles ». En effet, comme nous allons le voir dans le paragraphe suivant, dans la campagne « cinématique », l'augmentation du nombre de passages à travers l'œillet (20 dans la campagne « cinématique » contre 10 dans la campagne « Guide-fils » est responsable d'une chute des propriétés mécaniques de la mèche de 10% environ.

II. 2) Campagne 2 : Cinématique

Pour rappel, dans cette campagne, les paramètres à tester étaient la vitesse d'avancée de la mèche de chaîne, sa tension, et le nombre de passages successifs.

Les niveaux associés à chacun de ces facteurs sont donnés en table 4-9.

Paramètres	Nb de niveaux	Valeurs des paramètres
Vitesse	2	0,05 m.min-1
		0,5 m.min-1
Tension	2	100g
		400g
Nombre de cycles	2	5 cycles
		20 cycles
Œillet	F	
Matière	F	

Table 4-9 Facteurs et niveaux de la campagne 2 : « Cinématique »

La table 4-10 indique les différentes configurations à tester, d'après le plan d'expérience fractionnaire qui a été retenu.

Lot n°	Vitesse m/min	Tension	Nombre de cycles
1	0,5	100	5
2	0,05	100	20
3	0,5	400	20
4	0,05	400	5

Table 4-10 Configurations générées par le plan d'expérience fractionnaire pour la campagne 2 : « Cinématique »

II. 2. a) Résultats des tests de traction

Les résultats moyennés par lot, sont donnés en table 4-11.

	Nombre d'éprouvettes	Force maximale		Force à rupture		Allongement à rupture	
		(N)		(N)		(mm)	
		Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
Lot1	10	779,5	129,2	707,4	116,0	1,7	0,3
Lot2	10	659,7	132,9	606,8	128,7	1,4	0,3
Lot3	10	437,1	162,2	401,4	152,2	1,1	0,2
Lot4	10	811,5	88,8	742,3	80,8	1,8	0,3

Table 4-11 Résultats moyennés et écart-types des essais de traction de la campagne 2 : « Cinématique »

■ Résolution du plan d'expérience

Les résultats obtenus pour la résolution du plan d'expérience « cinématique » sont résumés en table 4-12.

Prédicteur	Coeff	P
Constante	671,95	0,000
Vitesse	-63,63	0,004
Tension	47,65	0,027
Nombre de cycles	123,54	0,000
S = 130,927 R carré = 58,3 %		

Table 4-12 Résultats de l'analyse par régression de la campagne 2 : « Cinématique »

Nous pouvons observer que les effets les plus importants sont ceux du nombre de cycles et de la vitesse. Seule la tension n'est pas significative statistiquement, en comparaison avec les autres facteurs.

L'équation de régression obtenue est la suivante :

$$Force\ max(N) = 672 - 63,6 \times Vitesse + 47,6 \times Tension + 124 \times Nombre\ de\ cycles$$

■ Identification des tendances

Le graphique des effets principaux pour la force maximale (en N) est donné en figure 4-8.

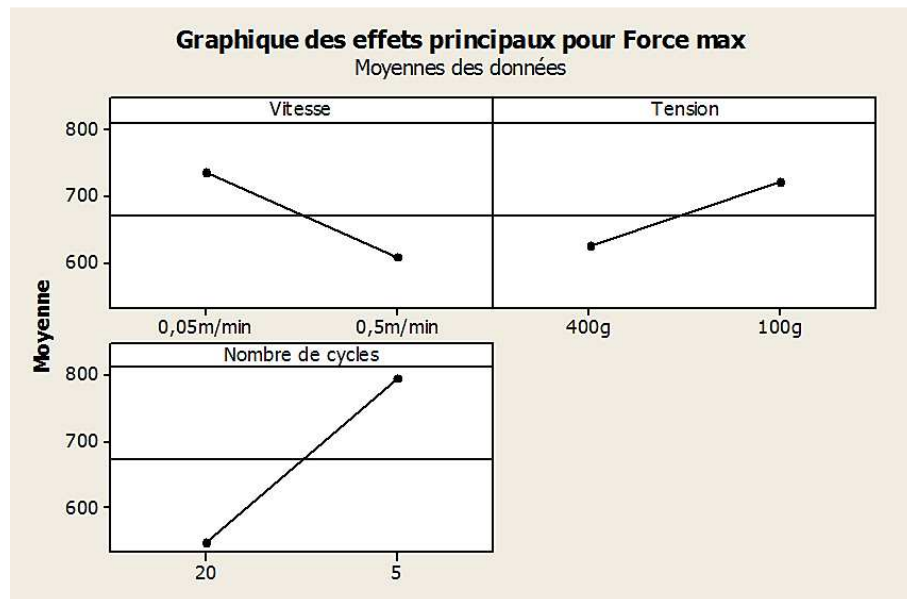


Figure 4-8 Graphique des effets principaux pour force max (N) – Campagne 2 : « Cinématique »

Le terme ayant le plus d'impact sur les propriétés mécaniques de la mèche est le nombre de cycles. Le passage de 5 à 20 cycles est responsable d'une chute de 247 N en moyenne de la force maximale.

Nous pouvons également constater qu'une vitesse moins élevée est moins dégradante pour la mèche, de même qu'une tension plus faible permet de conserver de meilleures propriétés mécaniques pour la mèche. Ces mesures confirment le fait que plus la vitesse et la tension sont élevées, plus les frottements entre la mèche et l'œillet sont importants.

Le diagramme des interactions pour la campagne « cinématique » est donné en figure 4-9.

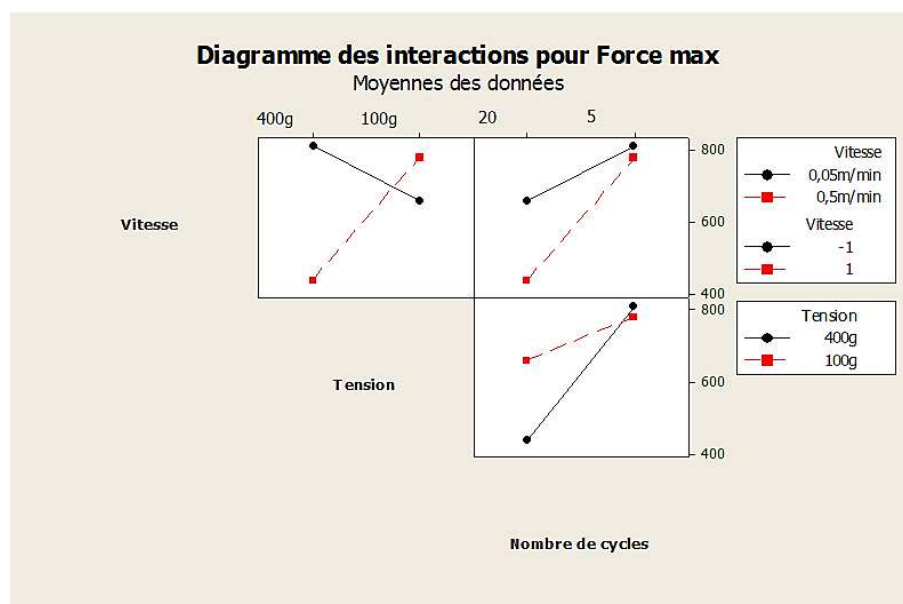


Figure 4-9 Diagramme des interactions pour force max (N) – Campagne 2 : « Cinématique »

Nous constatons que la vitesse et la tension sont des termes qui interagissent : lorsque la tension est élevée (en l'occurrence 400g) et que la vitesse est faible (0,05m/min), la force maximale est d'environ 800N contre environ 400N pour une vitesse de 0,5m/min.

Concernant le nombre de cycles, il ne semble pas y avoir d'interaction significative avec les autres paramètres.

II. 2. b) Résultats des essais morphologiques

Pour chaque lot, une éprouvette de mèche a été analysée par traitement et analyse d'images selon le protocole décrit dans le chapitre précédent. Les résultats sont donnés en table 4- 13.

Numéro de lot	Vitesse (m/min)	Tension (g)	Nombre de cycles	Indicateur surface carbone	Indicateur surface mèche	Indicateur de filaments rompus	Largeur mèche (mm)	
							Moyenne	Ecart- type
Lot 1	0,5	100	5	2,11E+07	2,11E+07	625	4,60	0,18
Lot 2	0,05	100	20	8,00E+06	8,00E+06	6 927	2,70	0,37
Lot 3	0,5	400	20	7,02E+06	7,01E+06	7 244	1,48	0,53
Lot 4	0,05	400	5	2,07E+07	2,07E+07	956	2,64	0,31

Table 4- 13 Résultats morphologiques – Campagne 2 : « Cinématique »

■ Identification des tendances

Les graphiques des effets principaux sont donnés en

figure 4-10.

La tension et le nombre de cycles n'ont quasiment aucune influence sur le nombre de filaments apparemment rompus devant la vitesse. Plus la vitesse est élevée, plus le nombre de filaments

apparemment rompus est important. Cela tend à dire que plus la vitesse est élevée, plus la mèche est dégradée.

Les trois paramètres ont par contre de l'influence sur la largeur de la mèche. Plus la vitesse est faible, plus la mèche est large. De même, le nombre de cycles a une grande influence sur la largeur de la mèche : plus le nombre de cycles est important, plus la mèche se compacte et sa largeur apparente est faible. Ces tendances suivent celles identifiées lors de la caractérisation mécanique. A l'inverse, l'effet de la tension sur la largeur de la mèche va à l'inverse des résultats mécaniques : plus la tension est importante, plus la largeur de mèche est importante.

Enfin, l'écart-type de la largeur de la mèche, qui est ici considéré comme un indicateur de « désordre » ou de dispersion du profil de la mèche est maximal lorsque la vitesse, la tension et le nombre de cycles sont le plus élevés.

▪ Résolution du plan d'expérience

Les équations de régression qui relient les indicateurs morphologiques aux différents facteurs sont les suivantes :

Indicateur de filaments rompus = 3938 + 3147 Vitesse + 4 Tension - 162 Nombre de cycles

Indicateur de largeur mèche moyenne = 360 + 24 Vitesse + 100 Tension + 96 Nombre de cycles

Indicateur écart-type largeur mèche = 44 + 1,3 Vitesse – 9 Tension – 13 Nombre de cycles

II. 2. c) Conclusions de la campagne « cinématique »

Cette campagne a permis de montrer que le paramètre le plus influent sur la force maximale de la mèche était, et de loin, le nombre de cycles de passages de la mèche à travers un œillet, suivi par la vitesse et la tension. Ces tendances ont également été observées dans le cas de la caractérisation morphologique, et en particulier dans le cas de l'indicateur de dispersion de la largeur de la mèche. Dans le cas de l'indicateur de filaments apparemment rompus, ces résultats sont confirmés, avec cependant une influence relative des différents paramètres très différente.

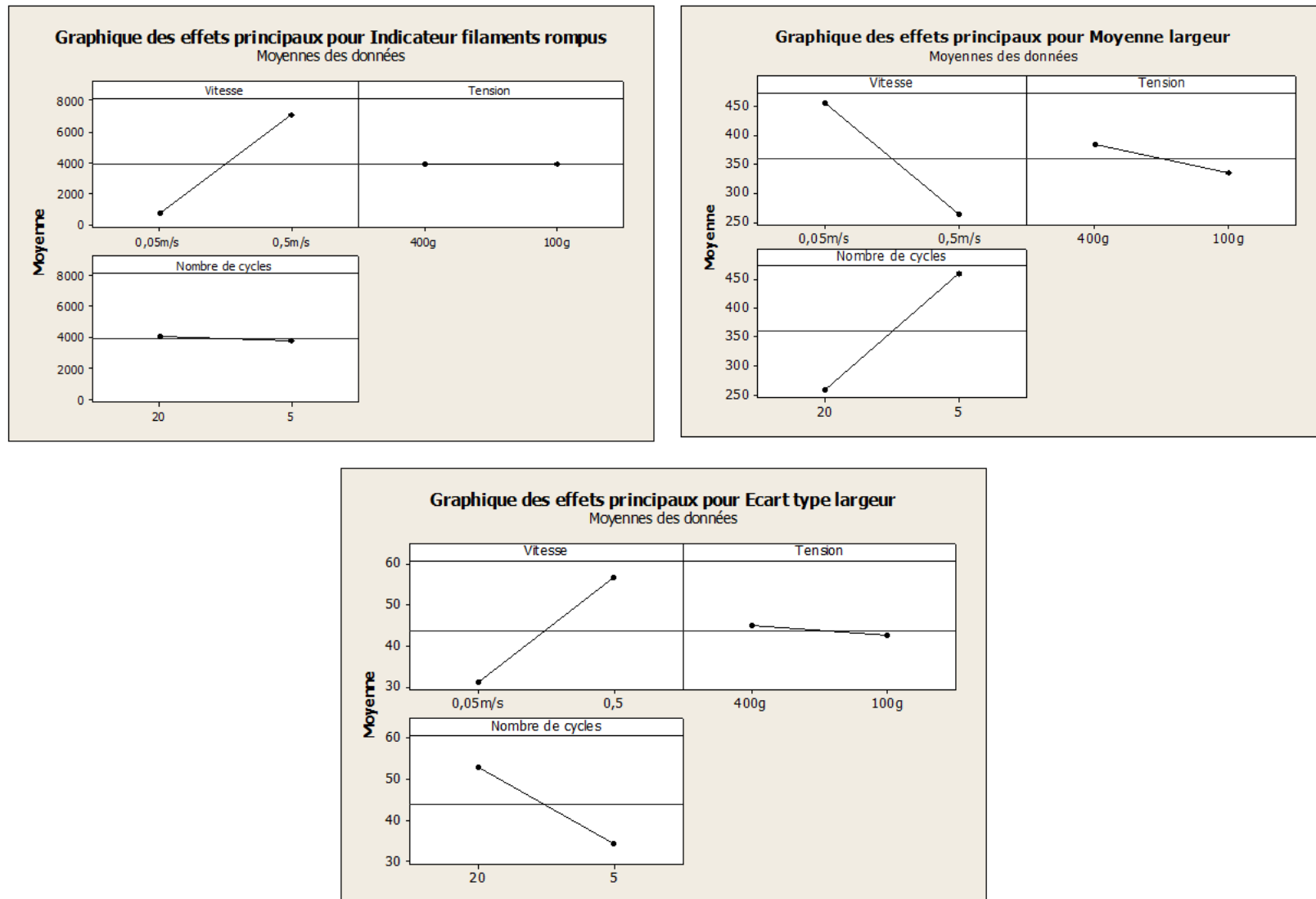


Figure 4-10 Graphiques des effets principaux sur résultats morphologiques – Campagne 2 : « Cinématique

II. 3) Campagne 3 : Matière – Ensimage

Pour rappel, dans cette campagne, l'objectif était de tester l'influence de la quantité d'ensimage ainsi que celle du module de la fibre sur l'endommagement de la mèche.

Les niveaux associés aux différents facteurs à tester dans cette campagne sont donnés en table 4-14.

Paramètres	Nb de niveaux	Valeurs des paramètres
Quantité d'ensimage	3	0%
		0,50%
		1,01%
Référence	2	AS7
		IM7
Titre	F	
Vitesse	F	
Tension	F	
Nombre de cycles	F	

Table 4-14 Facteurs et niveaux de la campagne 3 : « Matière ensimage »

La table 4-15 indique les différentes configurations à tester, d'après le plan d'expérience qui a été retenu.

Lot n°	Fibre	Ensimage
1	IM7	GP
2	IM7	GS
3	IM7	0%
4	AS7	GS
5	AS7	GP
6	AS7	0%

Table 4-15 Configurations générées par le plan d'expérience fractionnaire pour la campagne 3 : « Matière – Ensimage »

II. 3. a) Résultats des tests de traction

Les résultats moyennés par lot, sont donnés en table 4-16.

	Nombre d'éprouvettes	Force maximale		Force à rupture		Allongement à rupture	
		(N)		(N)		(mm)	
		Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
Lot1	8	553,1	58,9	499,9	53,1	1,3	0,1
Lot2	10	526,4	61,3	475,0	55,6	1,2	0,1
Lot3	10	240,4	51,3	216,8	46,2	1,2	0,2
Lot4	8	604,1	78,0	551,6	69,4	1,4	0,4
Lot5	10	779,5	129,2	707,4	116,0	1,7	0,3
Lot6	10	419,9	95,2	379,3	86,0	1,4	0,2

Table 4-16 Résultats moyennés et écart-types des essais de traction de la campagne 3 : « Matière ensimage »

▪ Résolution du plan d'expérience

Le plan factoriel complet général dont le nombre de niveaux diffère suivant les facteurs ne permet pas une résolution de type « analyse du plan d'expérience ». Il faut recourir à une analyse par régression linéaire. Les résultats de cette analyse sont donnés en table 4-17.

Prédicteur	Coeff	P
Constante	505,25	0
Fibre	4,78	0,813
Ensimage	81,78	0,001
S = 157,392 R carré = 16,5 %		

Table 4-17 Résultats de l'analyse par régression de la campagne 3 : « Matière ensimage »

L'équation de régression obtenue est la suivante :

$$Force\ max(N) = 505 - 4,8 \times Fibre + 81,8 \times Ensimage$$

▪ Identification des tendances

Le graphique des effets principaux sur la force maximale (en N) des facteurs « fibre » et « ensimage » est donné en figure 4-11.

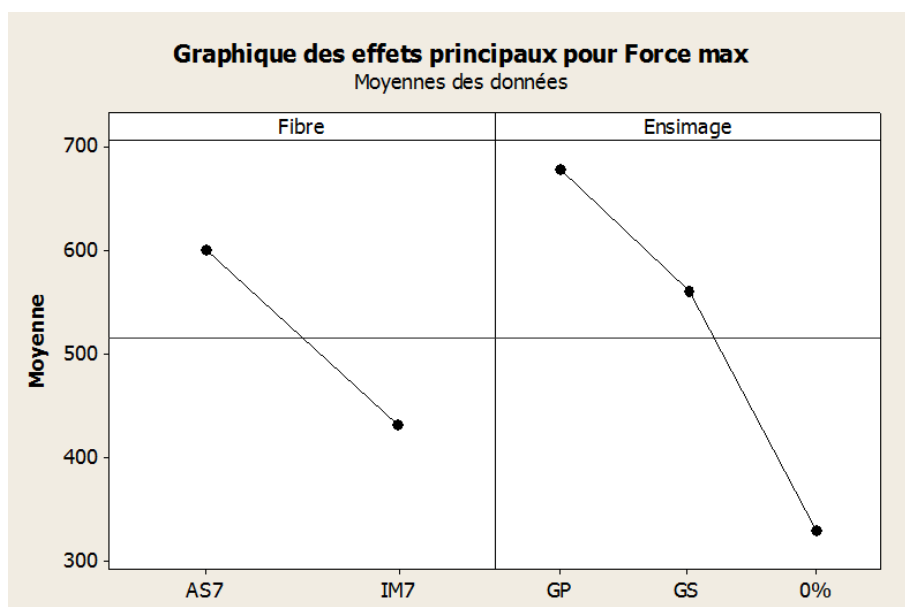


Figure 4-11 Graphique des effets principaux pour force max (N) – Campagne 3 : « Matière - ensimage »

La lecture de ce graphique n'est pas directement pertinente pour le facteur « fibre », puisque les deux fibres testées, l'AS7 et l'IM7, n'ont pas les mêmes caractéristiques mécaniques (voir fiches techniques en annexe 3 et 4). Néanmoins, nous remarquons que l'ensimage a une influence très importante sur les propriétés mécaniques des fibres testées. Plus la quantité d'ensimage est faible, plus la valeur moyennée de la force maximale (en N) est faible.

L'observation du diagramme des interactions des facteurs testés sur la force maximale, donné en figure 4-12, apporte davantage d'informations.

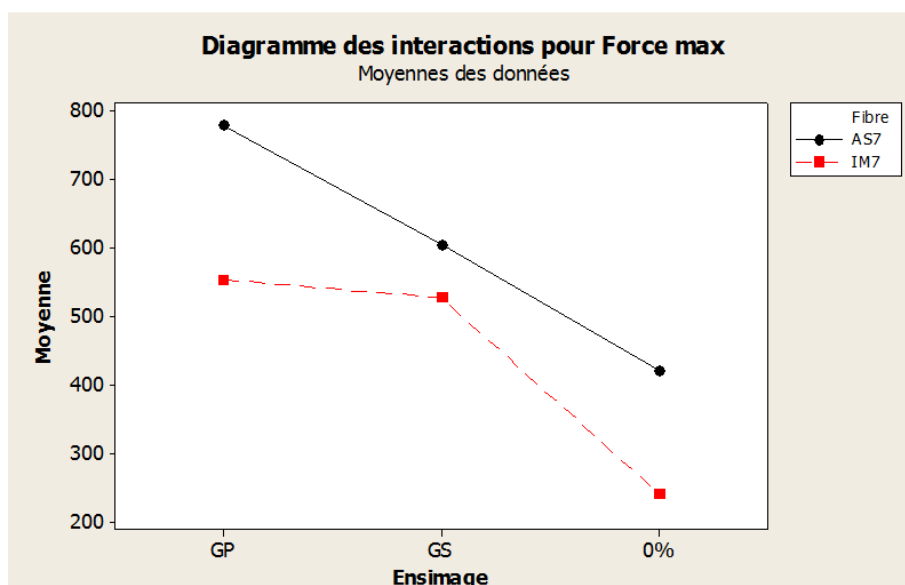


Figure 4-12 Diagramme des interactions pour force max (N) - Campagne 3 : « Matière – ensimage »

Pour les deux fibres testées, l'absence d'ensimage entraîne une dégradation de la matière au passage de l'œillet et donc une chute des propriétés mécaniques (-357 N pour la fibre AS7, -313 N pour la fibre IM7). Cela s'explique par le fait que l'ensimage est destiné, en partie, à protéger la

fibres du frottement lors des opérations de transformation textile et à donner de la cohésion à la mèche. Lorsque l'ensimage est absent, la mèche n'a plus de cohésion, les filaments constituant la mèche se dissocient et deviennent vulnérables aux différents phénomènes de frottement.

II. 3. b) Résultats des essais morphologiques

Pour chaque lot, une éprouvette de mèche a été analysée par traitement d'images selon le protocole décrit dans le chapitre précédent.

Les résultats sont donnés en table 4-18.

Numéro de lot	Fibre	Ensimage	Indicateur surface carbone	Indicateur surface mèche	Indicateur filaments rompus	Largeur mèche (mm)	
						Moyenne	Ecart-type
Lot 1	IM7	GP	2,21E+07	1,01E+06	2,11E+07	4,01	0,25
Lot 2	IM7	GS	2,01E+07	1,50E+06	1,86E+07	5,17	0,25
Lot 3	IM7	0%	1,17E+07	3,62E+05	1,14E+07	4,80	0,29
Lot 4	AS7	GS	1,17E+07	3,88E+05	1,13E+07	4,74	0,25
Lot 5	AS7	GP	1,28E+07	9,73E+05	1,19E+07	4,78	0,25
Lot 6	AS7	0%	1,15E+07	3,67E+05	1,11E+07	3,60	0,25

Table 4-18 Résultats morphologiques – Campagne 3 : « Matière – Ensimage »

Les résultats des acquisitions d'images sont particulièrement marqués pour cette campagne et disponibles en figure 4-13.

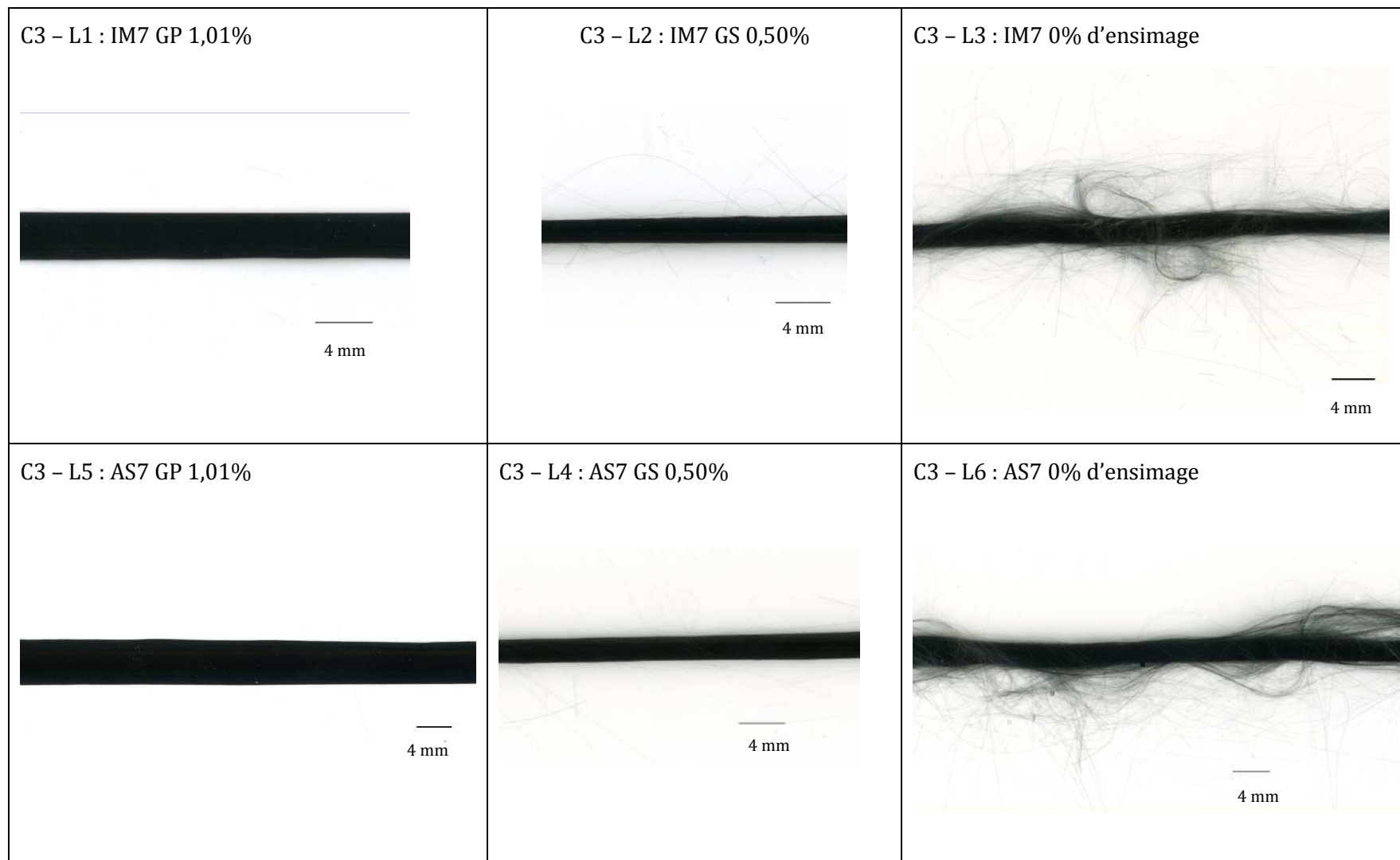


Figure 4-13 Morphologie de mèches – Campagne 3 : « Matière ensimage

»

■ Identification des tendances

Le graphique des effets principaux sur l'indicateur de filaments rompus est donné en figure 4-14.

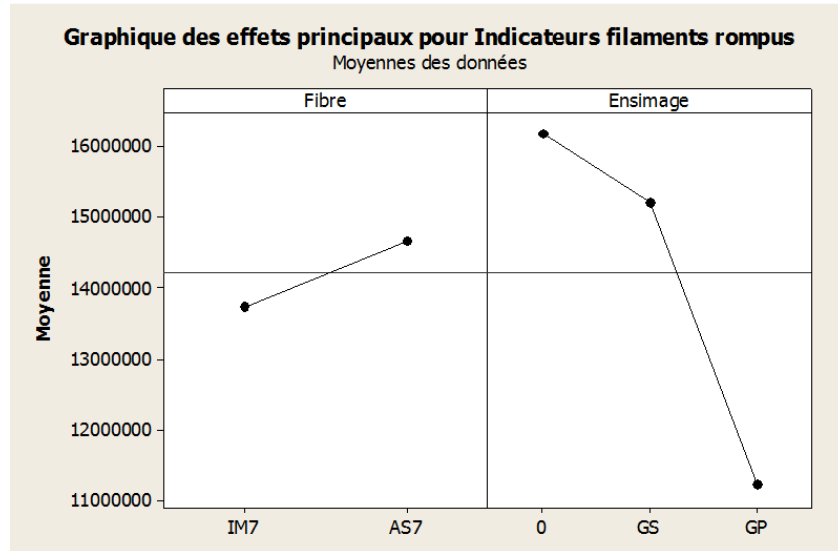


Figure 4-14 Graphique des effets principaux sur l'indicateur de filaments rompus – Campagne 3 : « Matière ensimage »

Nous observons que le nombre de filaments apparemment rompus est supérieur dans le cas de la fibre AS7, ce qui tendrait à montrer que cette référence serait plus fragile que la fibre IM7.

D'autre part, l'ensimage a une grande influence sur le nombre de filaments apparemment rompus, ce qui va dans le même sens que les résultats des essais mécaniques. En effet, moins la fibre est ensimée (GS 0,5% d'ensimage, GP 1,1%), plus l'indicateur de filaments rompus est élevé. Cela s'explique par le fait que l'ensimage a pour fonction de consolider les mono-filaments entre eux et de les « gainer » pour les protéger des frottements.

■ Résolution du plan d'expérience

L'équation de régression qui relie l'indicateur de filaments rompus aux différents facteurs est la suivante :

$$\text{Indicateur de filaments rompus} = 1,42 \cdot 10^7 + 2,8 \cdot 10^6 \times \text{Fibre} - 2,62 \cdot 10^6 \times \text{Ensimage}$$

II. 3. c) Conclusions de la campagne « matière-ensimage »

Cette campagne a clairement montré l'influence de l'ensimage sur les propriétés mécaniques et morphologiques de la mèche. Une diminution voire une absence d'ensimage entraîne une chute brutale de la force mécanique et accélère la fibrillation de la mèche.

II. 4) Campagne 4 : Matière – Titre

Pour rappel, l'objectif de cette campagne était d'identifier l'influence du titre de la mèche, en fonction de sa référence (et en l'occurrence de son module).

Les niveaux associés aux facteurs à tester sont données en table 4-19.

Paramètres	Nb de niveaux	Valeurs des paramètres
Titre	3	3K
		6K
		12K
Référence	2	IM7 (Fibre IM)
		AS7 (Fibre HR)
Ensimage	F	
Vitesse	F	
Tension	F	
Nombre de cycles	F	

Table 4-19 Facteurs et niveaux de la campagne 4 : « Matière –titre »

La table 4-20 indique les différentes configurations à tester, d'après le plan d'expérience fractionnaire qui a été retenu.

Lot n°	Module	Titre
1	IM	6K
2	HR	12K
3	IM	12K
4	HR	3K

Table 4-20 Configurations générées par le plan d'expérience fractionnaire pour la campagne 4 : « Matière –titre »

II. 4. a) Résultats des tests de traction

Les résultats moyennés par lot sont donnés en table 4-21.

	Nombre d'éprouvettes	Force maximale		Force à rupture		Allongement à rupture	
		(N)		(N)		(mm)	
		Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
Lot1	10	201,8	21,0	183,0	18,5	0,9	0,1
Lot2	10	461,7	68,9	417,8	63,2	1,3	0,2
Lot3	10	357,2	61,9	322,0	55,8	1,0	0,2
Lot4	10	204,7	32,4	188,5	30,4	1,1	0,2

Table 4-21 Résultats moyennés et écart-types des essais de traction de la campagne 4 : « Matière –titre »

▪ Résolution du plan d'expérience

Les résultats de cette analyse sont donnés en table 4-22.

Terme	Coeff	P
Constante	306,4	0
Module	-26,8	0,002
Titre	-103,1	0

S = 50,1388	R carré = 84,13 %
--------------------	--------------------------

Table 4-22 Résultats de l'analyse par régression de la campagne « Matière –titre »

L'équation de régression obtenue est la suivante :

$$Force\ max(N) = 306,4 - 26,8 \times Module - 103,1 \times Titre + 25,4 \times Module \times Titre$$

▪ Identification des tendances

Le graphique des effets principaux sur la force maximale (en N) des facteurs « module » et « titre » est donné en figure 4-15.

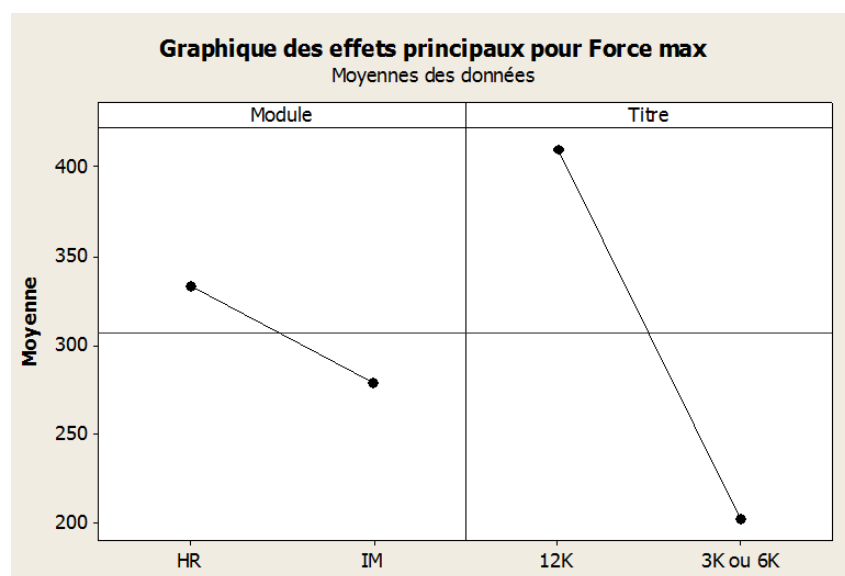


Figure 4-15 Graphique des effets principaux pour force max (N) : Campagne 4 : « Matière - titre »

Conformément à ce que nous pouvions attendre compte-tenu de leurs propriétés mécaniques, la force maximale en traction est supérieure dans le cas de la fibre HR que dans celui de la fibre IM.

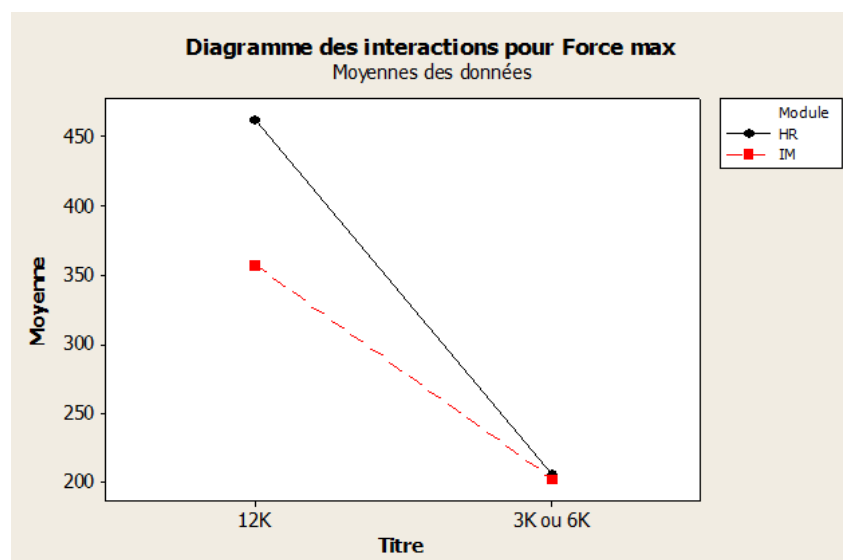


Figure 4-16 Diagramme des interactions pour la force maximale (en N) – Campagne 4 : « Matière - titre »

Nous constatons sur la figure 4-16 qu'il n'y a pas d'interaction majeure entre les deux paramètres étudiés.

II. 4. b) Résultats des essais morphologiques

Pour chaque lot, une éprouvette de mèche a été analysée par traitement d'images selon le protocole décrit dans le chapitre précédent.

Les résultats sont donnés en table 4-23.

Numéro de lot	Module	Titre	Indicateur surface carbone	Indicateur surface mèche	Indicateur surface filaments rompus	Largeur mèche (mm)	
						Moyenne	Ecart type
Lot1	IM	6K	4,97E+06	8,14E+05	4,16E+06	1,08	0,64
Lot2	HR	12K	1,38E+07	1,38E+07	9,90E+03	4,78	0,25
Lot3	IM	12K	2,05E+07	2,05E+07	1,00E+04	3,49	0,10
Lot4	HR	3K	3,52E+06	3,17E+06	3,55E+05	1,21	0,60

Table 4-23 Résultats morphologiques – Campagne 4 : « Matière – Titre »

▪ Identification des tendances

Le graphique des effets principaux sur l'indicateur de filaments rompus est donné en figure 4-17.

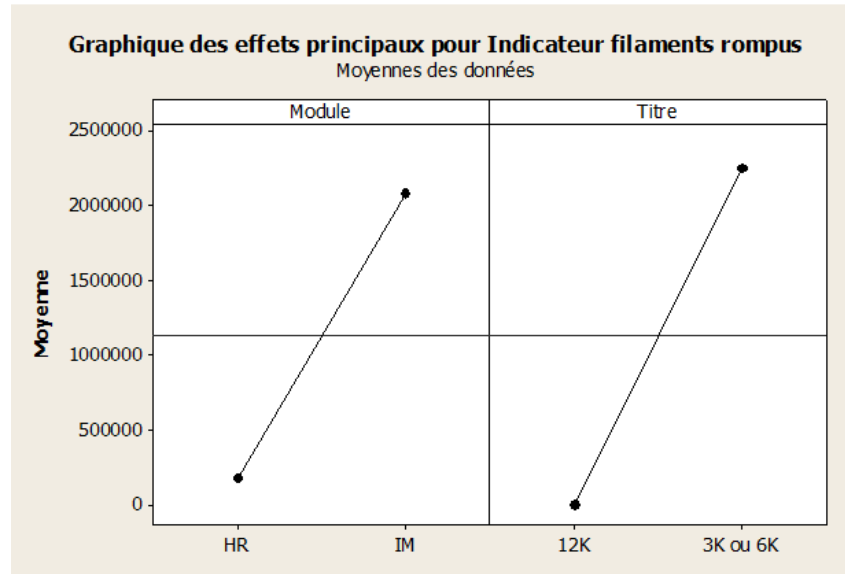


Figure 4-17 Graphique des effets principaux sur l'indicateur de filaments rompus – Campagne 4 : « Matière titre »

L'indicateur de filaments rompus est plus important pour la mèche IM que pour la mèche HR. Cela est peut-être dû que la fibre HR est plus résistante que la fibre IM, qui présente un module un module plus important et donc une fragilité plus grande.

L'indicateur de filaments rompus est plus élevé dans le cas de mèches 3K ou 6K. Cela laisse supposer que les mèches sont plus endommagées. Cela est corroboré par l'écart-type de la largeur de ces mèches qui est plus important que pour les mèches de titre 12K (voir table 4-23).

▪ Résolution du plan d'expérience

L'équation de régression qui relie l'indicateur de filaments rompus aux différents facteurs est la suivante :

$$\begin{aligned} \text{Indicateur de filaments rompus} \\ = 1,07.10^7 + 2,02.10^6 \times \text{Module} - 6,46.10^6 \times \text{Titre} - 1,29.10^6 \times \text{Module} \\ \times \text{Titre} \end{aligned}$$

II. 4. c) Conclusions de la campagne « titre »

Il est difficile de conclure sur la caractérisation mécanique pour cette campagne. En effet, les différentes mèches testées n'ont pas les mêmes propriétés mécaniques de référence. Cependant, nous constatons avec la caractérisation morphologique, que leur comportement diffère. L'indicateur de filaments rompus est significativement plus élevé dans le cas de petites mèches (3K ou 6K), et légèrement plus élevé dans le cas de fibres IM que dans le cas de fibres HR.

II. 5) Campagne 5 : Cadres

Pour rappel, cette campagne a pour objectif d'identifier l'influence de plusieurs paramètres de l'étape de sélection des fils de chaîne sur l'endommagement. Il a été choisi de fixer les paramètres de matériaux et de géométrie des lices et de se concentrer sur leur mouvement ainsi

que sur la position relative de la mèche vis-à-vis de l'œillet de la lice. Ainsi, ont été testés la vitesse et la course de montée et descente de la lice, le type de mouvement effectué (foule symétrique ou asymétrique) et la position de la mèche (mèche à l'intérieur de l'œillet ou mèche connexe, c'est-à-dire une mèche en contact avec une lice voisine).

Les différents niveaux associés aux facteurs à tester dans cette campagne sont donnés en table 4-24.

Paramètres	Nb de niveaux	Valeurs des paramètres
Matériaux	F	
Géométrie	F	
Type de mouvement des cadres	2	Symétrique
		Asymétrique
Vitesse	2	1 m.s ⁻¹
		9 m.s ⁻¹
Hauteur de montée	2	50 mm
		300 mm
Position relative de la mèche par rapport à l'œillet	2	Mèche à l'intérieur de l'œillet
		Mèche connexe
Vitesse	F	
Tension	F	
Matière	F	

Table 4-24 Facteurs et niveaux de la campagne 5 : « Cadres »

Lot n°	Type mouvement	Vitesse	Hauteur montée	Position relative
1	-1	1	-1	1
2	-1	1	1	-1
3	-1	-1	1	1
4	-1	-1	-1	-1
5	1	-1	-1	1
6	1	-1	1	-1
7	1	1	-1	-1
8	1	1	1	1

Table 4-25 Configurations générées par le plan d'expérience fractionnaire pour la campagne 5 : « Cadres »

La table 4-25 indique les différentes configurations à tester, d'après le plan d'expérience fractionnaire qui a été retenu.

II. 5. a) Résultats des tests de traction

Les résultats moyennés par lot, sont donnés en table 4-26.

	Nombre d'éprouvettes	Force maximale		Force à rupture		Allongement à rupture	
		(N)		(N)		(mm)	
		Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
Lot1	10	522,6	105,9	477,0	97,1	1,3	0,2
Lot2	10	719,6	102,8	654,5	95,6	1,7	0,3
Lot3	10	769,5	126,7	697,8	112,5	1,7	0,2
Lot4	10	753,1	94,2	687,7	91,0	1,5	0,3
Lot5	10	819,6	71,1	739,7	63,0	1,6	0,2
Lot6	10	712,3	110,3	661,1	96,4	1,6	0,4
Lot7	10	655,3	154,7	598,3	153,4	1,4	0,3
Lot8	10	714,7	101,3	645,8	90,4	1,4	0,2

Table 4-26 Résultats moyennés et écart-types des essais de traction de la campagne 5 : « Cadres »

■ Résolution du plan d'expérience

Les résultats obtenus pour la résolution du plan d'expérience « cadres » sont donnés en table 4-27.

Prédicteur	Coeff	P
Constante	708,36	0,000
Type mouvement	17,15	0,217
Vitesse	-55,29	0,000
Hauteur montée	20,69	0,137
Position relative	-1,73	0,900
S = 123,125 R carré = 21,0 %		

Table 4-27 Résultats de l'analyse par régression de la campagne 5 : « Cadres »

Nous observons que l'effet le plus important est celui de la vitesse. De nombreux paramètres étant statistiquement non significatifs, il faudrait procéder à des essais supplémentaires pour augmenter la taille des populations.

L'équation de régression obtenue est la suivante :

$$\begin{aligned}
 \text{Force max}(N) &= 708 + 17,2 \times \text{Type de mouvement} - 55,3 \times \text{Vitesse} + 20,7 \\
 &\quad \times \text{Hauteur de montée} - 1,7 \times \text{Position relative}
 \end{aligned}$$

■ Identification des tendances

Le graphique des effets principaux est donné en figure 4-18.

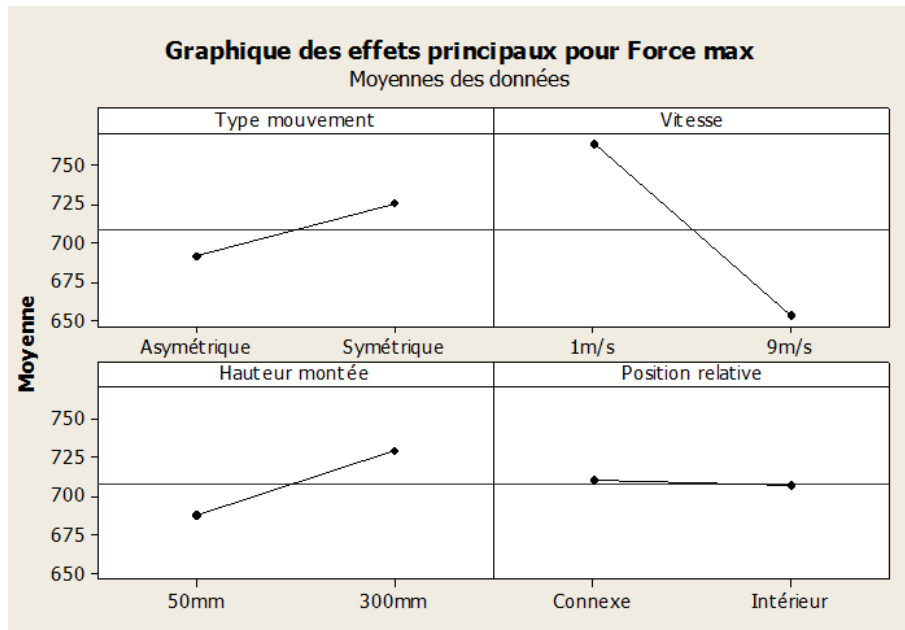


Figure 4-18 Graphique des effets principaux pour force max (N) - Campagne 5 : « Cadres »

Visuellement, nous remarquons que le paramètre le plus influent sur la valeur de la force maximale est la vitesse, suivie du type de mouvement et de la hauteur de montée. La position relative ne semble pas avoir un impact sur la moyenne de la force maximale à rupture de la mèche. Le mouvement symétrique des lices semble être plus favorable à la mèche pour garantir la résistance à rupture optimale de la mèche de carbone, comme nous pouvions le pressentir. En effet, contrairement au mouvement asymétrique, les efforts de cisaillement sur la mèche sont répartis sur la face supérieure et inférieure de celle-ci.

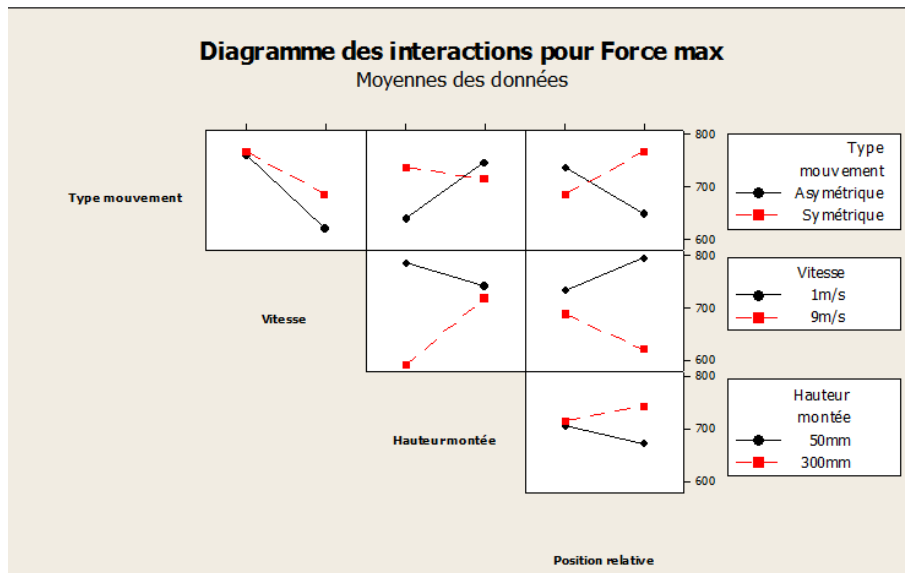


Figure 4-19 Diagramme des interactions pour force max (N) – Campagne 5 : « Cadres »

La figure 4-19 montre qu'il y a de nombreuses interactions entre les différents paramètres de cette campagne. Hormis le couple type de mouvement – vitesse, tous les paramètres évoluent de

manières différentes selon le paramètre avec lequel ils sont couplés. Par exemple, la vitesse a une grande influence sur l'impact de la hauteur de montée sur la force maximale (en N).

II. 5. b) Résultats des essais morphologiques

Pour chaque lot, une éprouvette de mèche a été analysée par traitement d'images selon le protocole décrit dans le chapitre précédent. Les résultats sont donnés en table 4-28.

Numéro de lot	Type mouvement	Vitesse	Hauteur montée	Position relative	Indicateur surface carbone	Indicateur surface mèche	Indicateur filaments rompus	Largeur mèche (mm)	
								Moyenne	Ecart-type
Lot1	Asymétrique	9m/s	50mm	Intérieur	1,59E+07	1,59E+07	134	3,45	0,34
Lot2	Asymétrique	9m/s	300mm	Connexe	2,19E+07	2,19E+07	87	4,75	0,33
Lot3	Asymétrique	1m/s	300mm	Intérieur	2,35E+07	2,35E+07	92	5,08	0,41
Lot4	Asymétrique	1m/s	50mm	Connexe	2,30E+07	2,30E+07	89	4,98	0,31
Lot5	Symétrique	1m/s	50mm	Intérieur	2,50E+07	2,50E+07	80	5,42	0,23
Lot6	Symétrique	1m/s	300mm	Connexe	2,17E+07	2,17E+07	93	6,23	0,15
Lot7	Symétrique	9m/s	50mm	Connexe	2,00E+07	2,00E+07	103	6,77	0,11
Lot8	Symétrique	9m/s	300mm	Intérieur	2,18E+07	2,18E+07	90	6,21	0,16

Table 4-28 Résultats morphologiques – Campagne 5 : « Cadres »

■ Identification des tendances

Le graphique des effets principaux est donné en figure 4-20.

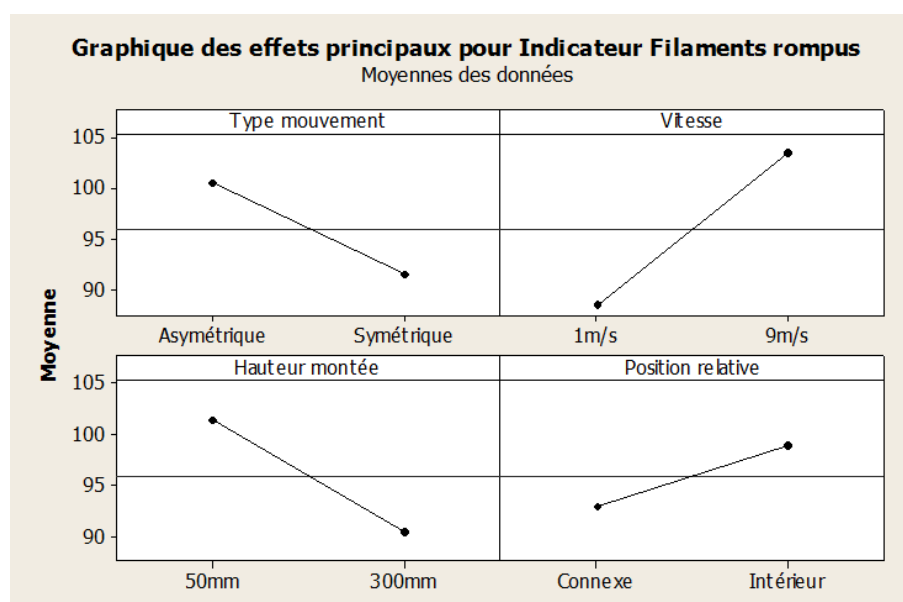


Figure 4-20 Graphique des effets principaux sur l'indicateur de filaments rompus – Campagne 5 : « Cadres »

Les paramètres qui ont le plus d'influence sur l'indicateur de filaments cassés sont, par ordre décroissant, la vitesse, la hauteur de montée, le type de mouvement et la position relative.

Un mouvement asymétrique contribue à augmenter le nombre de filaments apparemment rompus. Cela concorde avec les résultats de la caractérisation mécanique.

De même, le nombre de filaments apparemment rompus augmente lorsque la vitesse augmente.

La position qui entraîne le plus de filaments rompus est celle où la mèche est à l'intérieur de l'œillet.

Comme pour la caractérisation mécanique, une hauteur de montée plus importante n'implique pas une augmentation du nombre de filaments apparemment rompus.

▪ Résolution du plan d'expérience

L'équation de régression qui relie l'indicateur de filaments apparemment rompus aux différents facteurs est la suivante :

Indicateur de filaments rompus

$$= 96,0 - 4,50 \times \text{Type de mouvement} + 7,50 \times \text{Vitesse} - 5,50 \\ \times \text{Hauteur de montée} + 3,00 \times \text{Position relative}$$

II. 5. c) Conclusions de la campagne « cadres »

Cette campagne a montré que les paramètres les plus influents sur la force maximale de la mèche étaient la vitesse, la hauteur de montée, le type de mouvement et enfin, dans une moindre mesure, la position relative. La situation la plus favorable pour la mèche correspond à une vitesse faible, un mouvement symétrique et une hauteur de montée de 300mm plutôt que 50mm. Ces tendances sont vérifiées dans le cas de la caractérisation morphologique, avec néanmoins des pondérations différentes de l'influence des différents facteurs sur le nombre de filaments apparemment rompus.

II. 6) Campagne 6 : Peigne

Pour rappel, dans cette campagne, il s'agissait de tester l'influence de plusieurs paramètres liés à l'étape de tassage sur l'endommagement de la mèche de carbone. Parmi ces paramètres, la géométrie de la dent du peigne (elliptique ou ronde), le calibre du peigne, c'est-à-dire sa densité de dents par cm, ainsi que sa course et sa vitesse ont été testés. L'angle d'attaque formé entre la mèche et le peigne a aussi été testé.

Les différents niveaux associés aux facteurs à tester sont donnés en table 4-29.

Paramètres	Nb de niveaux	Valeurs des paramètres
Matériaux	F	
Géométrie	2	Section elliptique
		Section ronde
Course	2	50 mm
		250 mm
Vitesse du peigne	2	0,6 m.s-1
		1,4 m.s-1
Calibre	2	2 dents/cm
		4 dents/cm
Angle d'attaque	2	0°
		30°
Densité de fils de chaîne	F	24 fils/cm
Vitesse	F	
Tension	F	

Table 4-29 Facteurs et niveaux de la campagne 6 : « Peigne »

La table 4-30 indique les différentes configurations à tester, d'après le plan d'expérience fractionnaire qui a été retenu.

Lot n°	Géométrie	Course	Vitesse	Calibre	Angle attaque
1	Ronde	250 mm	0,6 m/s	4 dts/cm	0°
2	Elliptique	50 mm	0,6 m/s	2 dts/cm	30°
3	Ronde	250 mm	1,4 m/s	4 dts/cm	30°
4	Elliptique	250 mm	1,4 m/s	4 dts/cm	0°
5	Elliptique	250 mm	1,4 m/s	2 dts/cm	30°
6	Elliptique	50 mm	1,4 m/s	2 dts/cm	0°
7	Ronde	50 mm	1,4 m/s	4 dts/cm	0°
8	Ronde	50 mm	1,4 m/s	2 dts/cm	30°
9	Elliptique	250 mm	0,6 m/s	4 dts/cm	30°
10	Ronde	50 mm	0,6 m/s	4 dts/cm	30°
11	Elliptique	50 mm	0,6 m/s	4 dts/cm	0°
12	Ronde	250 mm	0,6 m/s	2 dts/cm	30°
13	Elliptique	50 mm	1,4 m/s	4 dts/cm	30°
14	Elliptique	250 mm	0,6 m/s	2 dts/cm	0°
15	Ronde	50 mm	0,6 m/s	2 dts/cm	0°
16	Ronde	250 mm	1,4 m/s	2 dts/cm	0°

Table 4-30 Configurations générées par le plan d'expérience fractionnaire pour la campagne 6 : « Peigne »

II. 6. a) Résultats des tests de traction

Les résultats moyennés par lot, sont donnés en table 4-31.

	Nombre d'éprouvettes	Force maximale (N)		Force à rupture (N)		Allongement à rupture (mm)	
		Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
Lot1	10	804,8	78,5	725,6	72,0	1,5	0,3
Lot2	10	806,5	141,2	734,5	145,1	1,4	0,2
Lot3	10	710,0	114,4	642,5	103,7	1,3	0,2
Lot4	10	914,1	117,5	829,6	101,4	1,8	0,2
Lot5	10	762,1	108,7	686,9	97,7	1,6	0,2
Lot6	10	791,1	93,2	714,4	85,2	1,6	0,2
Lot7	10	815,8	84,2	736,3	75,6	1,7	0,2
Lot8	10	730,7	106,6	658,8	96,1	1,6	0,3
Lot9	10	916,3	36,3	827,8	34,1	1,5	0,2
Lot10	10	863,1	119,1	783,9	111,0	1,5	0,4
Lot11	10	860,0	53,3	777,5	47,4	1,5	0,1
Lot12	10	770,3	64,7	695,0	59,2	1,4	0,1
Lot13	10	907,6	93,9	825,1	88,7	1,6	0,2
Lot14	10	780,5	64,2	704,3	57,0	1,5	0,3
Lot15	10	733,8	70,5	661,0	63,4	1,4	0,2
Lot16	10	818,1	81,2	738,3	73,2	1,6	0,2

Table 4-31 Résultats moyennés et écart-types des essais de traction de la campagne 6 : « Peigne »

■ Résolution du plan d'expérience

Les résultats obtenus pour la résolution du plan d'expérience « peigne » sont donnés en table 4-32.

Prédicteur	Coeff	P
Constante	811,556	0,000
Géométrie	-30,719	0,000
Course	-2,025	0,796
Vitesse	-5,365	0,494
Calibre	-37,417	0,000
Angle attaque	3,222	0,681

S = 99,0763 R carré = 20,2 %

Table 4-32 Résultats de l'analyse par régression de la campagne 6 : « Peigne »

L'équation de régression obtenue est la suivante :

$$\begin{aligned}
 \text{Force max}(N) &= 812 + 30,7 \times \text{Géométrie} - 2,03 \times \text{Course} - 5,36 \times \text{Vitesse} - 37,4 \\
 &\quad \times \text{Calibre} + 3,22 \times \text{Angle d'attaque}
 \end{aligned}$$

■ Identification des tendances

Le graphique des effets principaux sur la force maximale pour la campagne « peigne » est donné en figure 4-21.

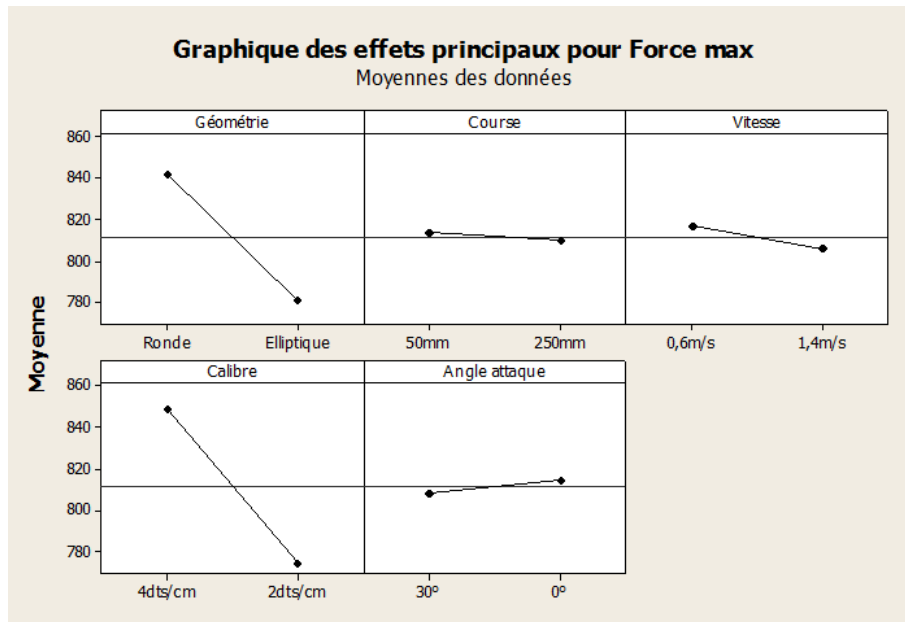


Figure 4-21 Graphique des effets principaux pour force max (N) : Campagne 6 : « Peigne »

Visuellement, nous remarquons que les paramètres les plus influents sur la force maximale (en N) sont le calibre (densité des dents) du peigne et la géométrie de ses dents.

Plus le calibre est important, plus la force maximale à rupture est élevée. Cela est dû au fait qu'à densité égale de fils, un peigne dont le calibre est plus élevé permet de mieux séparer les mèches entre elles. Cela tend donc à penser que les frottements entre mèches sont plus endommageant que les frottements entre la mèche et le métal de la dent.

Les dents à section ronde permettent d'obtenir une force maximale à rupture plus élevée.

Les autres paramètres sont moins significatifs mais ils montrent que la force maximale à rupture est plus élevée lorsque la vitesse et la course sont moins importantes et que l'angle d'attaque est nul.

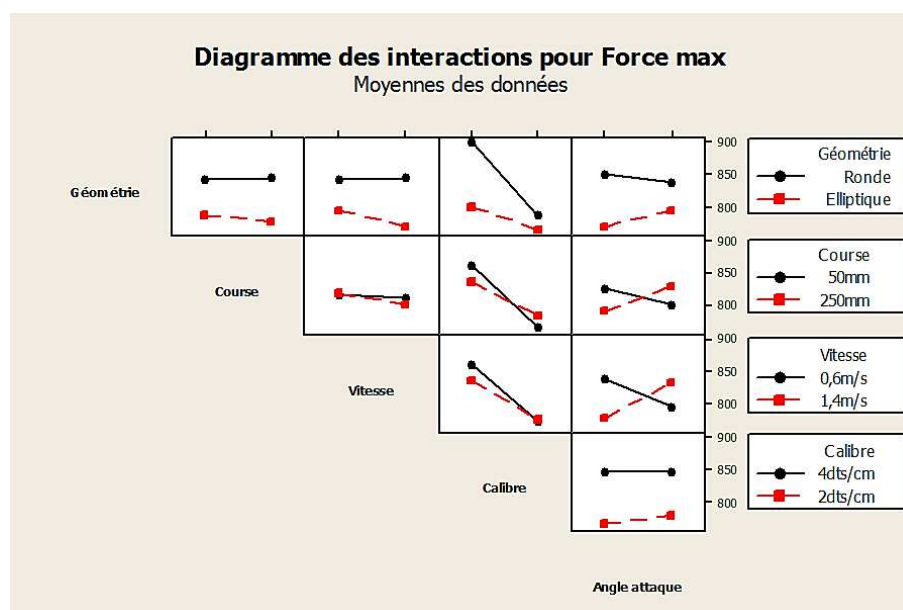


Figure 4-22 Diagramme des interactions pour force max (N) : Campagne 6 : « Peigne »

Hormis pour l'angle d'attaque, il y a peu d'interactions entre les différents paramètres.

II. 6. b) Résultats des essais morphologiques

Pour chaque lot, une éprouvette de mèche a été analysée par traitement d'images selon le protocole décrit dans le chapitre précédent. Les résultats sont donnés en table 4-33.

Numéro de lot	Géométrie	Course	Vitesse	Calibre	Angle attaque	Indicateur surface carbone	Indicateur surface mèche	Indicateur filaments rompus	Largeur mèche (mm)	
									Moyenne	Ecart-type
1	Ronde	250mm	0,6m/s	4dts/cm	0°	2,19E+07	2,19E+07	70	4,76	0,50
2	Elliptique	50mm	0,6m/s	2dts/cm	30°	2,20E+07	2,20E+07	70	4,77	0,90
3	Ronde	250mm	1,4m/s	4dts/cm	30°	1,94E+07	1,94E+07	62	4,20	0,73
4	Elliptique	250mm	1,4m/s	4dts/cm	0°	2,49E+07	2,49E+07	80	5,40	0,75
5	Elliptique	250mm	1,4m/s	2dts/cm	30°	2,08E+07	2,08E+07	66	4,50	0,69
6	Elliptique	50mm	1,4m/s	2dts/cm	0°	2,16E+07	2,16E+07	69	4,68	0,59
7	Ronde	50mm	1,4m/s	4dts/cm	0°	2,22E+07	2,22E+07	71	4,82	0,53
8	Ronde	50mm	1,4m/s	2dts/cm	30°	1,99E+07	1,99E+07	64	4,32	0,68
9	Elliptique	250mm	0,6m/s	4dts/cm	30°	2,50E+07	2,50E+07	80	5,42	0,23
10	Ronde	50mm	0,6m/s	4dts/cm	30°	2,65E+07	2,65E+07	76	5,75	0,07
11	Elliptique	50mm	0,6m/s	4dts/cm	0°	2,66E+07	2,66E+07	75	5,77	0,16
12	Ronde	250mm	0,6m/s	2dts/cm	30°	2,97E+07	2,97E+07	67	6,44	0,13
13	Elliptique	50mm	1,4m/s	4dts/cm	30°	2,52E+07	2,52E+07	79	5,47	0,09
14	Elliptique	250mm	0,6m/s	2dts/cm	0°	2,93E+07	2,93E+07	68	6,36	0,13
15	Ronde	50mm	0,6m/s	2dts/cm	0°	3,12E+07	3,12E+07	64	6,76	0,12
16	Ronde	250mm	1,4m/s	2dts/cm	0°	2,80E+07	2,80E+07	72	6,07	0,10

Table 4-33 Résultats morphologiques – Campagne 6 : « Peigne »

■ Identification des tendances

Le graphique des effets principaux est donné en figure 4-23.

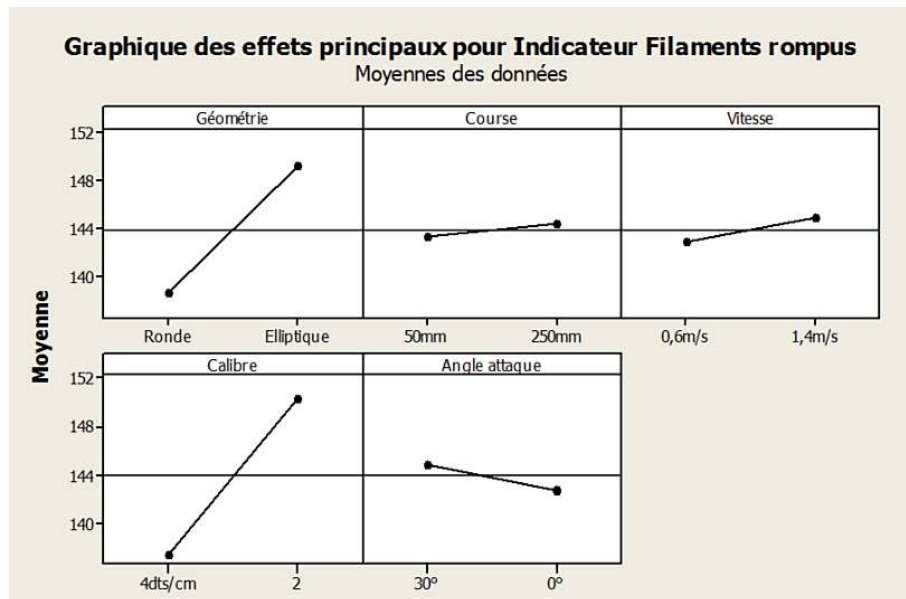


Figure 4-23 Graphique des effets principaux sur l'indicateur de filaments rompus – Campagne 6 :« Peigne »

Dans le cas de cette campagne, l'influence relative des différents paramètres sur l'indicateur de filaments rompus est la même que dans le cas de la caractérisation mécanique.

Plus le calibre est faible, plus il y a de frottements inter-mèches et plus le nombre de filaments rompus est important.

De même, le nombre de filaments apparemment rompus est maximal pour une course et une vitesse élevée, ainsi qu'un angle d'attaque non nul.

■ Résolution du plan d'expérience

L'équation de régression qui relie l'indicateur de filaments rompus aux différents facteurs est la suivante :

$$\begin{aligned}
 \text{Indicateur de filaments rompus} \\
 = 144 + 5,23 \times \text{Géométrie} + 0,53 \times \text{Course} + 0,96 \times \text{Vitesse} + 6,50 \\
 \times \text{Calibre} - 1,07 \times \text{Angle d'attaque}
 \end{aligned}$$

II. 6. c) Conclusions de la campagne « peigne »

Cette campagne a permis de montrer que les paramètres les plus influents sur la force maximale à rupture de la mèche étaient le calibre du peigne et la géométrie de la dent.

Les paramètres optimaux pour la mèche de carbone, tant pour la caractérisation mécanique que morphologique sont une course et une vitesse faibles, ainsi qu'un angle d'attaque nul.

III) Campagne cumulée

Dans les paragraphes précédents, nous avons mis en évidence les paramètres influents sur l'endommagement de la mèche de carbone, d'un point de vue mécanique, mais aussi morphologique. Cependant, les mèches testées pour les différentes campagnes étaient des mèches fournisseurs, et les différentes campagnes étant réalisées de manière indépendante, cela n'a pas permis d'observer l'influence cumulée des différents paramètres testés.

L'objectif de cette campagne est donc de cumuler les paramètres optimaux dans un cas, et les paramètres les plus critiques dans l'autre, afin de comparer l'interaction de ces facteurs sur la dégradation de la mèche de carbone et ses caractéristiques morphologiques et mécaniques.

Pour chaque campagne, les paramètres menant aux meilleurs et aux pires résultats mécaniques ont été identifiés. En effet, comme évoqué précédemment, les plans d'expérience présentent des points de recouvrement, c'est-à-dire qu'au moins une configuration est commune au moins aux quatre premières campagnes : guide-fil, cinématique, matière-titre, et matière ensimage. Pour les deux dernières campagnes – cadres et peigne – les points de recouvrement se font sur la vitesse de défilement de la mèche, sa tension, sa référence et son titre (dans les deux cas, une fibre HR 12K).

Dans cette campagne « cumulée », la mèche de carbone a rencontré successivement un œillet, une lice, puis un cadre, selon les paramètres décrits dans la table 4-34.

	Configuration optimisée	Configuration dégradée
Matière	AS7 GP 12K	AS7 GS 12K
Œillets	Titanate	Alumine
	Diamètre 100mm	Diamètre 5mm
	Angle d'attaque 0°	Angle d'attaque 90°
	1 cycle	20 cycles
	0,05 m/min	0,5 m/min
	100 g	400 g
Cadres	Montée symétrique	Montée asymétrique
	Course 300 mm	Course 50 mm
	1 m/s	9 m/s
	Intérieur	Intérieur
Peigne	Dents rondes	Dents elliptiques
	Course 50 mm	Course 250 mm
	0,6 m/s	1,4 m/s
	4 dents/cm	2 dents/cm
	Angle d'attaque 0°	Angle d'attaque 30°

Table 4-34 Paramètres appliqués par configuration - Campagne cumulée

Chacune des deux configurations constitue un lot de 9 éprouvettes. Ces lots de 9 éprouvettes ont été testés en traction, selon le protocole décrit dans le chapitre précédent (cf. chapitre III §IV.3).

Pour la configuration réunissant les paramètres les plus critiques, la mèche de carbone était si dégradée qu'une des éprouvettes s'est rompue avant d'être testée en traction (voir figure 4-24).

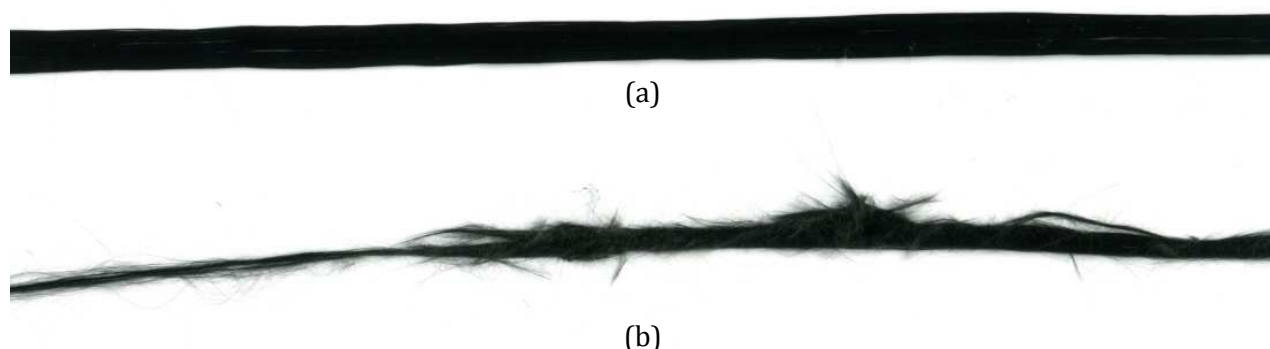


Figure 4-24 Mèche de carbone ayant subi la configuration optimisée (a) et la configuration dégradée (b)

Les résultats de ces essais mécaniques sont présentés en table 4-35.

Configuration optimisée				Configuration dégradée			
Eprou- vette n°	Force maximale	Force à rupture	Allonge- ment à rupture	Eprou- vette n°	Force maximale	Force à rupture	Allonge- ment à rupture
	N	N	mm		N	N	mm
1	685,5	618,2	1,3	1	628,2	568,3	1,4
2	866,3	782,1	1,6	2	695	632,2	1,9
3	789,5	713,8	1,4	3	634,7	575,6	1,5
4	807,8	727,2	1,4	4	232,8	211,2	1,1
5	835,7	766	2,3	5	244,7	220,6	1,6
6	724,4	653,9	1,4	6	304,6	274,7	1,5
7	696,5	627,1	1,5	7	647,8	585,5	2
8	746,9	672,7	1,3	8	162,2	147,6	3,3
9	855,5	770,7	1,5	Moyenne	443,7	401,9	1,8
Moyenne	778,7	703,5	1,5	Ecart type	226,1	205,2	0,7
Ecart type	68,2	63,0	0,3				

Table 4-35 Propriétés en traction des éprouvettes des configurations optimisée et dégradée – Campagne cumulée

Nous constatons que l'écart de force maximale entre les deux configurations est de 334,9 N soit une réduction de 43% entre la configuration optimisée et la configuration dégradée.

De même, l'écart-type est beaucoup plus important dans le cas de la configuration dégradée (+30% par rapport à la configuration optimisée). Cela indique que la configuration dégradée fait chuter les propriétés mécaniques de la mèche en valeur moyenne, tout en augmentant la dispersion des valeurs mesurées.

Ces résultats confirment l'influence de l'action cumulée des paramètres du procédé de tissage identifiés comme influents sur l'endommagement de la mèche de carbone. Ils justifient notamment l'attention toute particulière qui doit être portée à l'optimisation des paramètres de configuration appliqués lors de la fabrication des préformes. En effet, comme nous venons de le

voir, ces derniers peuvent être responsables d'une chute conséquente des propriétés mécaniques de la mèche de carbone.

Conclusion du chapitre IV

Dans ce chapitre, la mèche dégradée sur mesure, au moyen du banc de test décrit au chapitre précédent, a été caractérisée mécaniquement et morphologiquement.

Les choix des volumes de mesure ont été justifiés par la taille ainsi que la distribution statistique des défauts fournie par la littérature.

Pour chaque campagne, l'endommagement subi par la mèche a été caractérisé selon des indicateurs matériaux : (i) force à rupture, (ii) quantité de filaments cassés, (iii) largeur de la mèche. L'indicateur de la désorientation n'a pu être appliqué à l'ensemble des résultats, et n'a donc pas été utilisé pour l'analyse.

Cette double caractérisation a permis de mettre en évidence les paramètres les plus traumatisants pour la santé-matière de la mèche de carbone tout au long du procédé de tissage. Ainsi pour chaque étape, les paramètres optimaux du procédé de tissage ainsi que les interactions entre paramètres ont été identifiés. Il s'agit d'une première tendance basée sur une quantité limitée de configurations testées. Pour chacune, un modèle comportemental basé sur les essais réalisés a pu être établi, mettant en évidence le poids de chacun des paramètres.

L'influence cumulée des différents paramètres tout au long du procédé de tissage a été testée et a permis de montrer que l'écart de force maximale à rupture pouvait chuter jusqu'à 43% entre une configuration optimisée et dégradée des paramètres de tissage. Ces observations confirment les conclusions de chacune des campagnes d'essais prises indépendamment, et valident le fait qu'il n'y ait pas d'interaction supplémentaire non-identifiée lors des campagnes isolées.

Chapitre V – Recherche d'un modèle d'ajustement

Dans le chapitre précédent, l'influence des différents paramètres du procédé de tissage sur l'endommagement de la mèche de carbone a été quantifiée grâce à des indicateurs mécaniques et morphologiques. Cela a permis d'établir un lien entre les indicateurs (réponses de sortie) et les paramètres influents identifiés (facteurs d'entrée).

Dans la mesure où il existe des signes visibles de l'endommagement, il s'agit ici de rechercher une corrélation entre les indicateurs mécaniques et les indicateurs morphologiques présentés précédemment.

Dans un premier temps, une étude de corrélation est menée, afin d'établir s'il existe des relations entre les principaux indicateurs. Dans un deuxième temps, un modèle est proposé, permettant de recréer virtuellement les courbes de traction obtenues expérimentalement, et de faire le lien entre les indicateurs mécaniques et morphologiques pour mieux appréhender les phénomènes physiques pilotant l'endommagement.

PLAN DU CHAPITRE

I)	IDENTIFICATION DU LIEN MORPHOLOGIQUE / MECANIQUE	171
I. 1)	Objectif	171
I. 2)	Recherche des relations d'ajustements	171
I. 3)	Tentatives de linéarisation classique.....	172
II)	ETUDE DETAILLEE DE LA CAMPAGNE 1 – « GUIDE-FILS »	174
II. 1)	Corrections liées au montage.....	174
II. 2)	Etude comparée des courbes de références et des courbes de la campagne 1	175
III)	ESSAIS VIRTUELS SUR MECHE	181
III. 1)	Les modèles de la littérature.....	181
III. 2)	Modèle proposé	182
III. 3)	Essais virtuels et campagne virtuelle	184
III. 4)	Bilan de l'application du modèle	197
	CONCLUSION DU CHAPITRE V	200

I) Identification du lien morphologique / mécanique

I. 1) Objectif

Dans le chapitre qui précède, un certain nombre de modèles expérimentaux, liant les facteurs aux réponses mécaniques et morphologiques ont été établis.

Pour chaque campagne, les indicateurs mécaniques et morphologiques répondaient à des relations du type :

$$\text{Indicateur mécanique} = \text{Constante}_a + \sum_i a_i \times \text{Prédicteur}_i \quad (5.1)$$

$$\text{Indicateur morphologique} = \text{Constante}_b + \sum_j b_j \times \text{Prédicteur}_j \quad (5.2)$$

L'objectif de ce chapitre est de déterminer pour chaque campagne s'il existe une fonction de régression F qui relie la grandeur de sortie mécanique et la grandeur de sortie morphologique. Cette fonction permettrait de remonter au comportement mécanique de la mèche à partir de la caractérisation morphologique, sans devoir tester la mèche systématiquement – caractérisation non-destructive.

$$\text{Grandeur de sortie mécanique} = F(\text{Grandeur de sortie morphologique}) \quad (5.3)$$

L'évaluation de la pertinence du modèle se fait au moyen des valeurs de S, R² et R² ajusté, avec :

- S (en unité de la variable de réponse) qui représente la distance standard entre les données et la régression polynomiale. Plus S est petit, plus la droite est proche de l'ensemble des points, et plus le modèle est pertinent ;
- R², le coefficient de détermination, qui varie entre 0% et 100%, et correspond au pourcentage de la variation de la variable de réponse avec le modèle. Plus la valeur de R² est élevée, plus le modèle est ajusté aux données ;
- R² ajusté, qui est une version modifiée de R² tenant compte du nombre de termes du modèle.

I. 2) Recherche des relations d'ajustements

Avec X l'indicateur morphologique de surface de filaments rompus et Y l'indicateur mécanique de force à rupture, nous cherchons l'existence d'une régression polynomiale de type :

- Linéaire : de type $Y = a_0 + a_1 X$
- Quadratique : de type $Y = a_0 + a_1 X + a_2 X^2$
- Cubique : de type $Y = a_0 + a_1 X + a_2 X^2 + a_3 X^3$

Pour chaque campagne, nous traçons les points de coordonnées (Indicateur morphologique ; Indicateur mécanique) de chaque lot et nous recherchons la relation d'ajustement qui relie ces différents points.

Les valeurs des coefficients de corrélation R² et R² ajusté entre les points et la relation d'ajustement sont donnés en **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

Hormis pour la campagne « peigne », où le nombre de lots - donc la population statistique - est plus important, les coefficients de corrélation montrent qu'il n'y pas de relation directe entre les indicateurs mécaniques et morphologiques.

I. 3) Tentatives de linéarisation classique

Nous allons maintenant tester différentes méthodes de linéarisation classiques - et notamment la log-linéarisation - sur les résultats de la caractérisation morphologique, et particulièrement ceux issus de la campagne « Guide-Fils ».

Malgré des tentatives de linéarisation, l'étude comparative des indicateurs morphologiques (filaments rompus) et mécaniques (effort à rupture), résumée en table 5-2, n'a pas permis de mettre en évidence une relation simple entre ces deux réponses.

Chapitre V – Recherche d'un modèle d'ajustement

Campagne	Nombre de lots	S			R ²			R ² ajusté		
		Linéaire	Quadratique	Cubique	Linéaire	Quadratique	Cubique	Linéaire	Quadratique	Cubique
« Guide-Fils »	8	168,8	147,9	164,3	20,8%	49,4%	50,0%	7,6%	29,2%	12,6%
« Cinématique »	4	107,4	127,5	N/A*	73,3%	81,2%	N/A*	59,9%	43,5%	N/A*
« Matière-ensimage »	6	129,8	183,4	183,4	19,1%	19,2%	19,2%	0,0%	0,0%	0,0%
« Matière-titre »	4	122,6	73,8	N/A*	37,3%	88,6%	N/A*	5,9%	65,9%	N/A*
« Cadres »	8	28,6	29,2	32,4	91,2%	92,3%	92,4%	89,7%	89,3%	86,8%
« Peigne »	16	7,92	20,9	5,4	98,6%	91,1%	99,4%	98,5%	89,8%	99,3%

Table 5-1 Valeurs des coefficients de corrélation R² et R² ajusté par campagne

* Données insuffisantes pour l'analyse de régression polynomiale

Indicateurs	S			R ²			R ² ajusté		
	Linéaire	Quadratique	Cubique	Linéaire	Quadratique	Cubique	Linéaire	Quadratique	Cubique
Force max – log(Indicateur surface carbone)	172,3	160,8	179,6	17,5%	40,1%	40,3%	3,8%	16,2%	0,0%
Force max – log(Indicateur surface mèche)	172,3	160,8	179,6	17,5%	40,1%	40,3%	3,8%	16,2%	0,0%
Force max – log(Indicateur filaments rompus)	176,1	176,3	184,5	13,9%	28,0%	37,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Force max – $\frac{\text{Indicateur filaments rompus}}{\log(\text{Largeur mèche moyenne})}$	168,9	146,9	162,9	20,7%	50,0%	50,8%	7,5%	30,0%	13,9%
Force max – $\frac{\text{Indicateur filaments rompus}}{\text{Largeur mèche moyenne}}$	171,4	151,2	146,5	18,4%	47,0%	60,3%	4,8%	25,8%	30,5%
Force max – $\frac{\log(\text{Indicateur filaments rompus})}{\text{Largeur mèche}}$	183,7	173,4	169,1	6,2%	30,4%	47,1%	0,0%	2,6%	7,4%

Table 5-2 Valeurs des coefficients de corrélation R² et R² ajusté pour la campagne « Guide-fil » pour différents indicateurs linéarisés

II) Etude détaillée de la campagne 1 – « Guide-fils »

Afin d'aller plus loin dans la compréhension du lien entre les différentes réponses que sont les propriétés mécaniques en traction et les caractéristiques morphologiques et matériaux de la mèche - comme sa largeur ou le nombre visible de filaments rompus – il est nécessaire de s'intéresser aux paramètres inhérents à l'essai mécanique (longueur de jauge par filament, forme du profil de la résine dans les talons, ...). En effet, ces paramètres peuvent être d'ordre supérieur à ceux utilisés pour caractériser l'endommagement (forme de l'œillet, angle d'attaque, ...), induisant ainsi une dispersion supplémentaire qui masquerait l'effet des facteurs utilisés pour caractériser l'endommagement.

Cette étude détaillée est volontairement ciblée sur la campagne « guide-fils », car celle-ci présente un nombre de lots intermédiaire (8 lots) et met en jeu des facteurs relativement simples à appréhender, dans le sens où il ne s'agit que de paramètres statiques (au contraire des campagnes « cadres » ou « peigne » où les agents agressifs sont mobiles). D'autre part, la nature de la mèche de carbone est toujours la même (à l'opposé des campagnes « matière – titre » ou « matière – ensimage »). La campagne « cinématique » aurait également pu être retenue mais elle ne présentait pas assez de lots d'étude (seulement 4 contre 8 pour la campagne « guide-fils »).

Dans un premier temps, les courbes de traction effort/déformation vont être passées en revue. L'objectif de cette partie est de bien identifier les zones clés des courbes de traction : (i) zone de mise en tension, (ii) partie linéaire, (iii) effort maximal à rupture et enfin (iv) allongement. Dans un deuxième temps, un modèle mécanique du comportement du toron, basé sur les modèles de la littérature sera proposé. Celui-ci permet d'estimer l'impact de la modification d'indicateurs tels que (i) le désalignement, (ii) les sur-longueurs de filaments ou (iii) le nombre de filaments cassés, sur le comportement apparent des mèches.

II. 1) Corrections liées au montage

Dans un premier temps, afin de pouvoir comparer au mieux les essais, il faut tout d'abord écarter les erreurs aléatoires et systématiques liées à l'appareil de traction et au protocole d'essai, à savoir :

- Le « zéro machine », en effet, même si toutes les éprouvettes sont mises en place de la même façon, il existe toujours une légère différence de mise en tension d'une éprouvette à l'autre. Afin de pouvoir comparer les courbes en elles, celles-ci sont translatées afin que la première montée en effort corresponde d'essai en essai ;
- La raideur du montage.

Cette dernière est liée à la raideur de la machine mais aussi au talon. En effet, ceux-ci sont réalisés en imprégnant les fibres avec de la résine dans un talon en aluminium. Cette technique engendre des talons relativement souples [81], ce qui fausse la mesure d'allongement de la machine. Pour compenser cela, nous supposons que les essais de référence doivent présenter un module élastique (ou une rigidité) proche de la mesure du fournisseur. En considérant deux

ressorts en série, l'un pour le montage, l'autre pour l'éprouvette, comme représenté en figure 5-1, nous montrons que :

$$A_{epr} = A_{machine} - (A_{machine} - A_{epr}) = A_{machine} - \frac{F_{machine}}{K_{montage}}$$

Avec : A_{epr} l'allongement de l'éprouvette, $A_{machine}$ l'allongement de la machine, $F_{machine}$ la force de la machine et $K_{montage}$ la raideur du montage

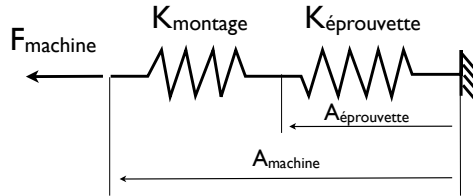


Figure 5-1 Représentation schématique du montage de traction [79]

L'identification réalisée sur les essais de référence nous donne :

$$K_{montage} \simeq 2420 \text{ N/mm.} \quad (5.5)$$

II. 2) Etude comparée des courbes de références et des courbes de la campagne 1

II. 2. a) Courbes de traction de référence

Les courbes de traction du lot de référence des mèches saines, issues de la bobine fournisseur (essais de traction à réception) sont présentées en figure 5-2. Les tests de traction sont réalisés en suivant le protocole présenté dans le chapitre III. La mèche théorique représente la courbe idéale, calculée d'après les données fournisseur (module, contrainte et allongement à rupture) pour un monofilament, et extrapolées à une mèche idéalement constituée de 12 000 filaments (identiques et présentant la même longueur de jauge). La figure 5-3 est un agrandissement de la zone initiale de mise en tension.

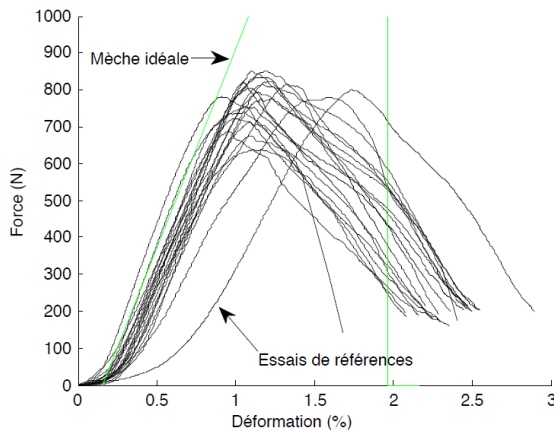


Figure 5-2 Courbes de traction du lot de référence

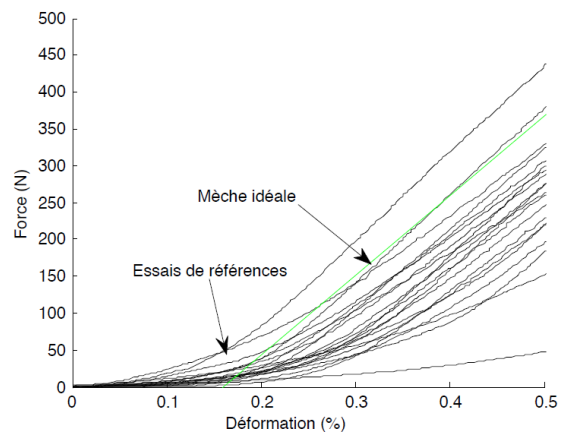


Figure 5-3 Zoom sur la partie de mise en tension des courbes du lot de référence

L'observation de ces courbes montre que la reproductibilité est plutôt bonne. Dans la zone de mise en tension, la non-linéarité est marquée. Ceci est principalement dû au fait que les filaments ne sont pas de longueur identique et que leur activation est différée, comme observé par Chudoba *et al.* [79]. Les zones de rigidité (et donc les modules en traction), ainsi que les forces à rupture sont peu dispersées.

Dans la suite du chapitre, ces observations vont servir de référence pour la comparaison avec les courbes de traction correspondant à des lots de mèches endommagées.

II. 2. b) Courbes de traction de la campagne 1 – « Guide-fils »

Pour chacun des lots de la campagne 1, l'objectif est de comparer le comportement des éprouvettes des lots endommagés avec le lot de référence, en se basant sur l'observation de :

- La dispersion du faisceau de courbes ;
- Les valeurs d'effort à rupture ;
- Les valeurs de module en traction ;
- Le mode de rupture - progressive ou brutale - en se basant sur l'observation de l'intervalle de déformation qui correspond à la rupture : plus cet intervalle est grand, plus la rupture est progressive ;
- La présence de sur-longueur, en se basant sur l'amplitude des déformations d'activation. En effet, chaque courbe de traction comporte une première zone de comportement non-linéaire qui correspond à l'activation de chaque fibre. Plus la fibre est en sur-longueur, plus son activation est retardée. L'abscisse à l'origine de la tangente à la zone linéaire est alors utilisée pour déterminer la quantité des sur-longueurs (représentée par des flèches rouges en figure 5-4).

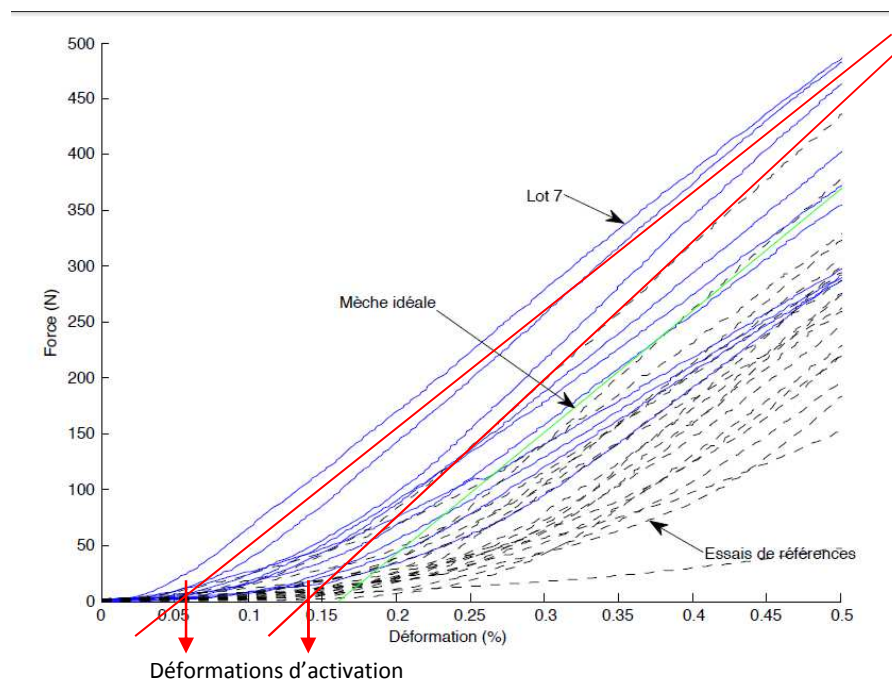


Figure 5-4 Méthode de caractérisation des sur-longueurs par les déformations d'activation – Exemple de la Campagne 1 – Lot 7

II. 2. b. (i) Lot 1

Les courbes de traction du lot 1 de la campagne 1 sont données en figure 5-5. La figure 5-6 est un agrandissement de la zone initiale de mise en tension. En pointillés sont représentées les courbes de traction du lot de référence.

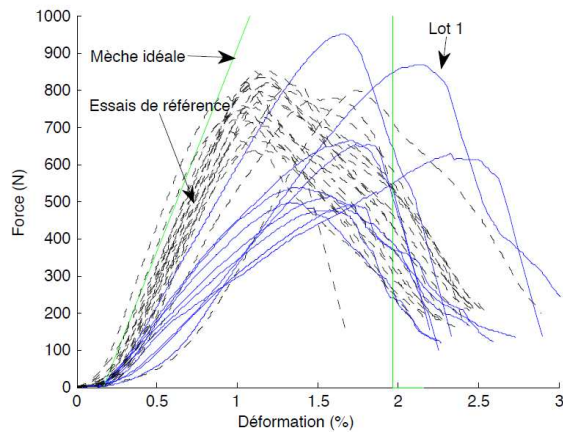


Figure 5-5 Courbes de traction de la campagne 1 – Lot 1

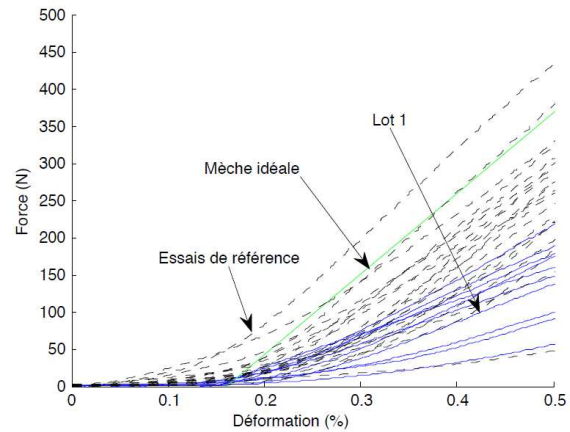


Figure 5-6 Zoom sur la zone de mise en tension – Campagne 1- Lot 1

Sur ces courbes, nous pouvons observer que les résultats sont très dispersés. La non-linéarité initiale est plus marquée que pour le lot de référence. Cela peut-être dû à des sur-longueurs de filaments, liées à une désorientation marquée. Nous pouvons également noter un assouplissement qui peut correspondre, soit à des modules élastiques plus faibles et donc à la présence de filaments rompus, soit à des sur-longueurs plus importantes.

II. 2. b. (ii) Lot 2

Les courbes de traction du lot 2 de la campagne 1 sont données en figure 5-7. La figure 5-8 est un agrandissement de la zone initiale de mise en tension. En pointillés sont représentées les courbes de traction du lot de référence. La courbe verte représente la mèche idéale telle que décrite dans le paragraphe précédent.

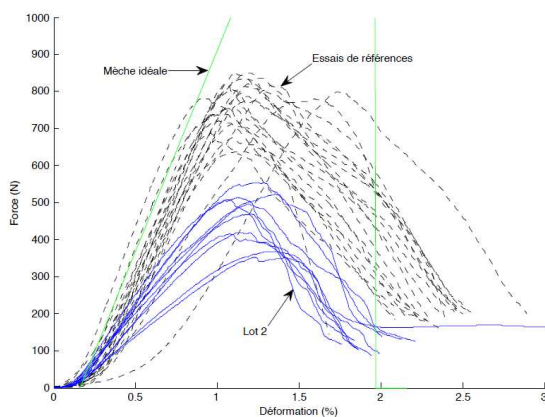


Figure 5-7 Courbes de traction de la campagne 1 – Lot 2

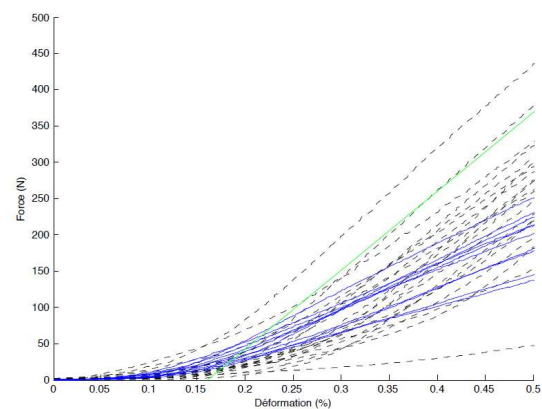


Figure 5-8 Zoom sur la zone de mise en tension – Campagne 1- Lot 2

Le faisceau de courbes est moins dispersé que pour le lot 1. La mise en tension semble être plus progressive, ce qui laisse supposer une présence importante de filaments en sur-longueur. Le

module élastique et les contraintes à rupture, sont beaucoup plus faibles que la référence, ce qui peut être lié soit à des ruptures de fibres, soit à des filaments en sur-longueur.

II. 2. b. (iii) Lot 3

Les courbes de traction du lot 3 de la campagne 1 sont données en figure 5-9. La figure 5-8 est un agrandissement de la zone initiale de mise en tension. En pointillés sont représentées les courbes de traction du lot de référence. La courbe verte représente la mèche idéale telle que décrite dans le paragraphe précédent.

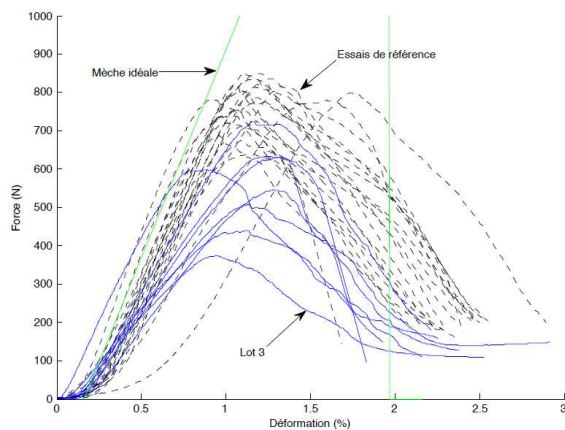


Figure 5-9 Courbes de traction de la campagne 1 – Lot 3

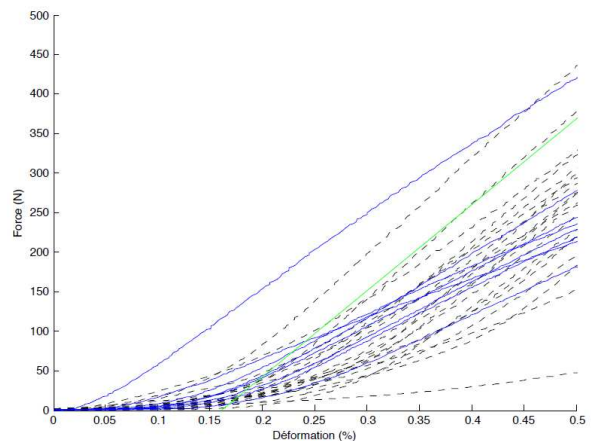


Figure 5-10 Zoom sur la zone de mise en tension – Campagne 1- Lot 3

Les efforts à rupture sont très dispersés. Ils sont dans leurs globalités beaucoup plus faibles que ceux du lot de référence. Les modules en traction sont sensiblement plus faibles que la référence, potentiellement à cause de ruptures de fibres ou bien de présence de filaments en sur-longueur. La rupture reste globalement progressive.

II. 2. b. (iv) Lot 4

Les courbes de traction du lot 4 de la campagne 1 sont données en figure 5-11. La figure 5-12 est un agrandissement de la zone initiale de mise en tension. En pointillés sont représentées les courbes de traction du lot de référence.

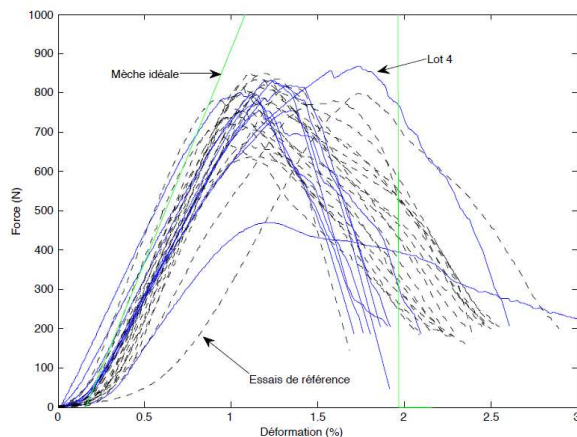


Figure 5-11 Courbes de traction de la campagne 1 – Lot 4

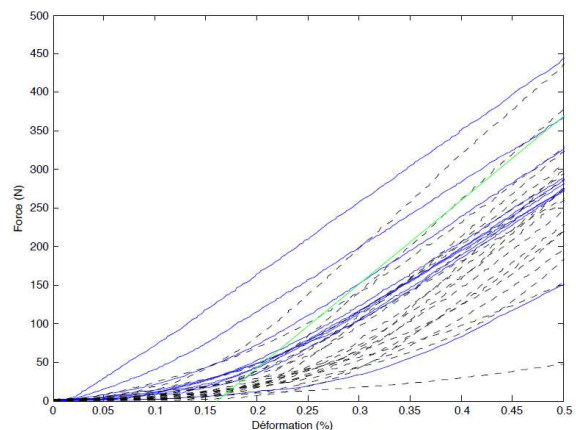


Figure 5-12 Zoom sur la zone de mise en tension – Campagne 1- Lot 4

Le faisceau de courbes est relativement bien regroupé, mis à part une éprouvette qui s'écarte fortement des autres (force à rupture beaucoup plus basse). Elle n'a tout de fois pas été retirée de la population statistique. Les modules en traction sont légèrement plus faibles que la référence. Les forces à rupture, quant à elles, sont très proches de la référence et peu dispersées. La rupture est moins progressive sur ce lot. Les sur-longueurs sont relativement plus faibles que la référence.

II. 2. b. (v) Lot 5

Les courbes de traction du lot 5 de la campagne 1 sont données en figure 5-13. La figure 5-14 est un agrandissement de la zone initiale de mise en tension. En pointillés sont représentées les courbes de traction du lot de référence.

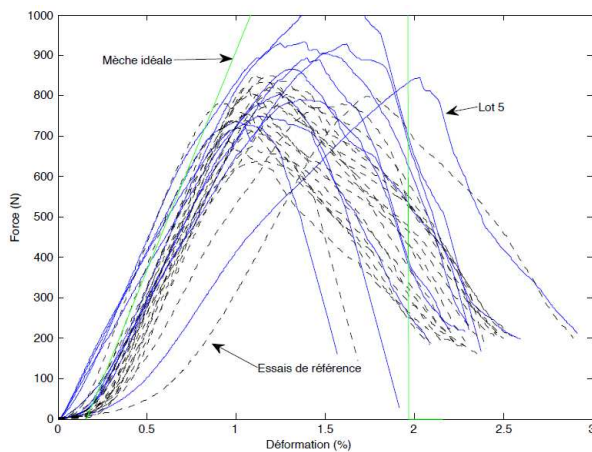


Figure 5-13 Courbes de traction de la campagne 1 – Lot 5

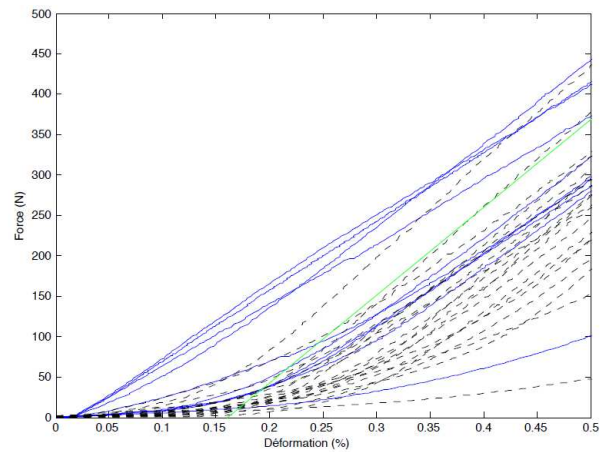


Figure 5-14 Zoom sur la partie de mise en tension - Campagne 1 - Lot 5

Les courbes sont relativement peu dispersées. Les modules élastiques sont légèrement plus faibles que la référence, mais les forces à rupture sont, elles, élevées. Les sur-longueurs sont comparables à la référence. Le comportement à rupture est proche de la référence, bien que la pente soit plus brutale.

II. 2. b. (vi) Lot 6

Les courbes de traction du lot 6 de la campagne 1 sont données en figure 5-15. La figure 5-16 est un agrandissement de la zone initiale de mise en tension. En pointillés sont représentées les courbes de traction du lot de référence.

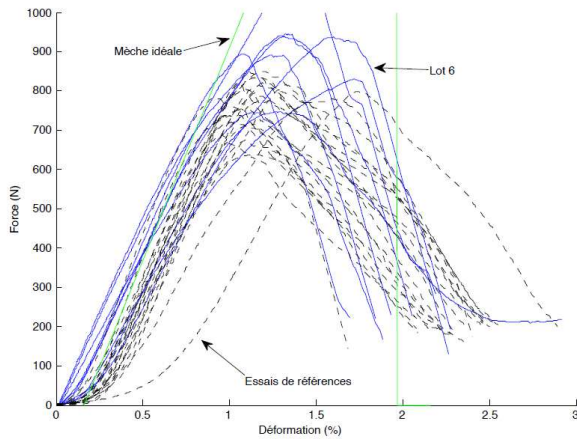


Figure 5-15 Courbes de traction de la campagne 1 – Lot 6

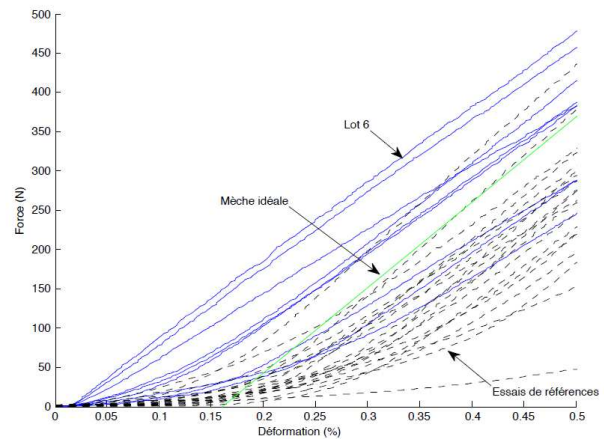


Figure 5-16 Zoom sur la zone de mise en tension- Campagne 1- Lot 6

Comme pour le lot 4, le faisceau de courbes est peu dispersé. Les modules élastiques sont très proches de la référence et les efforts à rupture légèrement plus élevés. Le comportement mécanique est plus fragile. C'est la différence majeure avec le lot de référence.

II. 2. b. (vii) Lot 7

Les courbes de traction du lot 7 de la campagne 1 sont données en figure 5-17. La figure 5-18 est un agrandissement de la zone initiale de mise en tension. En pointillés sont représentées les courbes de traction du lot de référence.

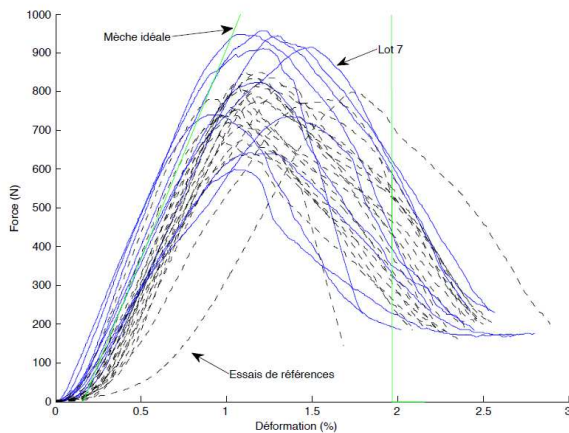


Figure 5-17 Courbes de traction de la campagne 1 – Lot 7

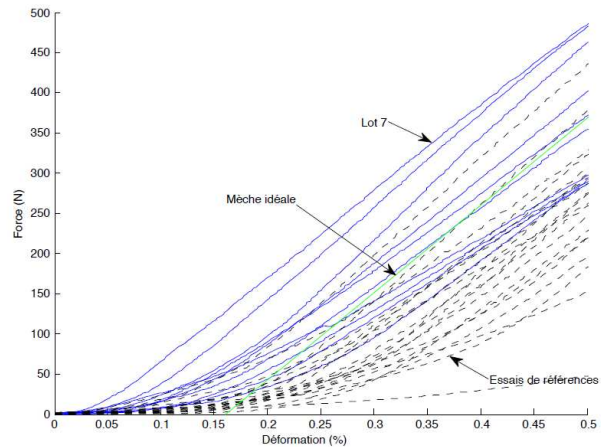


Figure 5-18 Zoom sur la zone de mise en tension - Campagne 1- Lot 7

Contrairement aux lots 4 et 6, le faisceau de courbes est relativement dispersé. Les contraintes à rupture sont de l'ordre de grandeur de la référence, bien que sensiblement plus dispersées. Les modules élastiques sont proches de la référence. Le nombre de filaments en sur-longueur semble être faible. La rupture est relativement progressive.

II. 2. b. (viii) Lot 8

Les courbes de traction du lot 8 de la campagne 1 sont données en figure 5-19. La figure 5-20 est un agrandissement de la zone initiale de mise en tension. En pointillés sont représentées les courbes de traction du lot de référence.

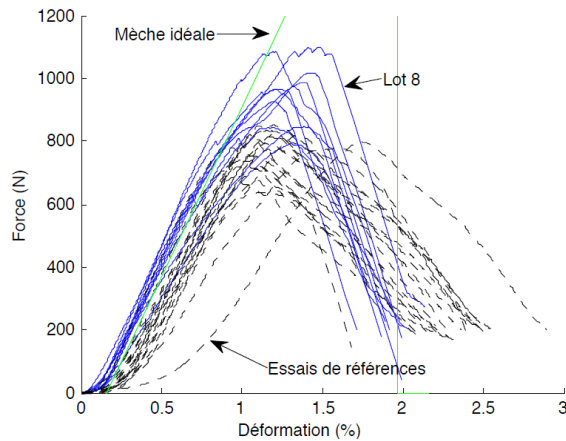


Figure 5-19 Courbes de traction de la campagne 1 – Lot 8

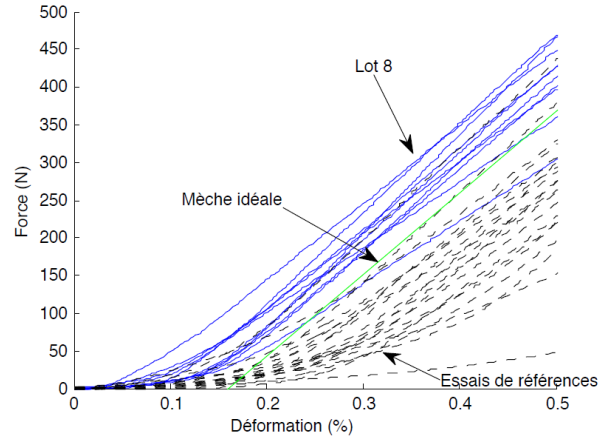


Figure 5-20 Zoom sur la zone de mise en tension- Campagne 1- Lot 8

Le faisceau de courbes est bien resserré. Les contraintes à rupture sont supérieures à la référence et les modules élastiques comparables. Le nombre de filaments en sur-longueur semble être faible. Le comportement à la rupture est assez fragile, et s'étale sur seulement 0.6% de déformation.

II. 2. c) Résumé des observations

Nous pouvons retenir de cette étude :

- Une dispersion importante sur les lots 1, 3 et 7 ;
- Des efforts à rupture dispersés et, soit plus faibles (lots 1 et 2), soit légèrement supérieurs à la référence (lots 5 et 6) ;
- Des modules sensiblement plus souples pour les lots 1 et 2 ;
- Une large plage de sur-longueurs (déformations d'activation) qui pourrait expliquer l'augmentation des efforts à rupture (car peu de sur-longueurs entraîne un effort plus important, voir paragraphe suivant) ;
- Des comportements à rupture passant de progressif à fragile pour les lots 4, 6 et 8 notamment.

III) Essais virtuels sur mèche

Afin de mieux comprendre l'impact des paramètres structuraux et/ou matériaux sur le comportement mécanique de la mèche, une modélisation est proposée. Celle-ci intègre les mécanismes physiques, et les hypothèses inhérentes, afin de décrire le comportement de mise en tension de la mèche de carbone.

III. 1) Les modèles de la littérature

La littérature propose un nombre important de modèles pour prédire le comportement de mèches sèches. Toutefois, cette partie ne s'attardera pas à en faire une synthèse exhaustive.

Les bases des modèles multi-filamentaires proviennent des travaux de Fisher et Tippet [82] et de Weibull [83], appelés modèles du maillon faible. Dans cette approche, la rupture dépend

d'une statistique de répartition de défauts dans l'objet étudié. Sur cette base, des modèles de mèches sèches ont été développés, en considérant un ensemble de fibres parallèles [84] [85] [86]. Dans ces derniers, les défauts suivent une loi de distribution de Weibull. Chacune des fibres rompt quand la force s'y appliquant dépasse une valeur critique. La charge est alors transmise, soit de façon équitable avec le reste de la population de filaments, soit sur les voisins, dans le cas de mèches imprégnées ou en présence d'un frottement important (cas des mèches fortement retordues). Les précédents modèles étant formulés en force, il n'est pas évident d'obtenir une courbe force-déplacement. Pour ce faire, une formulation en déformation est requise, comme dans les travaux de Phoenix et Taylor [87]. Dans ces travaux, il est possible de combiner des variabilités de plusieurs sortes (contraintes à rupture, longueurs de fibres, modules).

L'approche retenue ici se rapproche largement des travaux de Chudoba *et al.* [79], pour lesquels un modèle déterministe de la mèche – où chaque filament est représenté – est couplé à une simulation stochastique. Nous proposons ici une adaptation de ce modèle pour appréhender l'influence des filaments rompus sur le comportement de la mèche.

III. 2) Modèle proposé

Avant de présenter le modèle, il est important de rappeler les phénomènes que nous souhaitons prendre en compte et les hypothèses de modélisation.

Sur les courbes effort-déformation étudiées précédemment, il a été mis en évidence que les filaments n'ont pas la même longueur initiale. C'est un phénomène important car il joue à la fois sur la non-linéarité de la courbe mais surtout sur la force à rupture, car tous les filaments ne vont pas être chargés de la même façon et ne vont donc pas rompre au même instant.

De plus, le protocole de réalisation des talons par imprégnation de résine tend à rendre le front de résine non plan, comme le montre la figure 5-21. Ainsi, la déformation subie par chaque filament est différente.

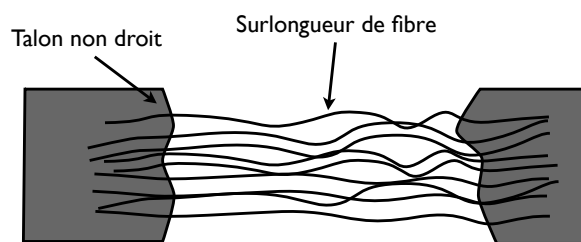


Figure 5-21 Profil de la résine dans les talons et sur-longueurs de fibre [79]

Enfin, le modèle doit tenir compte de la répartition des défauts dans la mèche. Cependant, peu de données sont disponibles sur la fibre de référence qui est ici utilisée pour nourrir ces lois de distribution. Ainsi, et à la différence des travaux de Chudoba [79] et Vorechovsky [81], seule la variabilité de la contrainte à rupture est conservée et supposée constante le long d'une fibre. Les paramètres tels que la section et le module élastique sont supposés constants le long et pour toutes les fibres. Par ailleurs, à la rupture d'une fibre, il sera considéré que l'effort est retransmis équitablement à toutes les fibres de la mèche. Nous négligeons ainsi le frottement entre les

fibres, sur lequel nous n'avons pas d'information. Cette approximation est justifiée par le fait que les mèches étudiées sont sans torsion ou avec une torsion très faible.

Considérons donc une mèche constituée uniquement de filaments. Chaque filament i a une longueur propre l_i qui dépend de la longueur nominale l (ici, la longueur de jauge) et de deux variables aléatoires, la sur-longueur $l_{\theta,i}$ – liée à l'ondulation et à la désorientation – et la longueur de prise au talon, $l_{\lambda,i}$, et θ_i la contrainte d'activation à partir de laquelle le filament i commence à travailler. Ainsi, nous définissons la longueur de la $i^{\text{ème}}$ fibre comme décrit sur la figure 5-22.

$$l_i = (1 + \theta_i)l_{\lambda,i} = (1 + \theta_i)(1 + \lambda_i)l \quad (5.6)$$

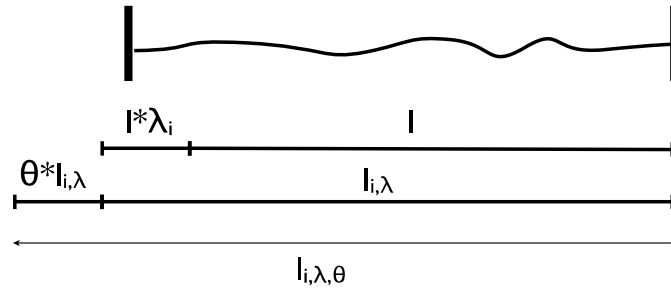


Figure 5-22 Longueurs de filament, prise au talon et sur-longueur [79]

L'effort généré par la tension d'un filament est proportionnel à sa déformation, mais aussi à la déformation d'activation ϵ_i et à sa déformation à rupture $\xi_i = \frac{\sigma_i}{E_i}$, avec σ_i la contrainte à rupture.

En effet, avant ou après ces deux bornes, l'effort est nul. Nous avons donc :

$$q_i(\epsilon) = E_i S_i \epsilon, \quad \text{si } \xi_i > \epsilon > \epsilon_i, \quad 0 \text{ sinon} \quad (5.7)$$

Lorsque que la mèche est soumise à un allongement u (et donc à une déformation e), nous avons :

$$\epsilon_i = \frac{u - \theta_i l_{i,\lambda}}{l_{i,\lambda,\theta}} = \frac{e - \theta_i (1 + \lambda_i) l}{l_{i,\lambda,\theta}} = \frac{e - \theta_i (1 + \lambda_i)}{(1 + \theta_i)(1 + \lambda_i)} \quad (5.8)$$

Ainsi, l'effort généré peut s'écrire sous la forme (en faisant appel à la fonction de Heaviside H) :

$$q_i(e) = E_i S_i \frac{e - \theta_i (1 + \lambda_i)}{(1 + \theta_i)(1 + \lambda_i)} H(e - \theta_i (1 + \lambda_i)) H(\xi_i - \frac{e - \theta_i (1 + \lambda_i)}{(1 + \theta_i)(1 + \lambda_i)}) \quad (5.9)$$

Nous noterons les expressions suivantes de la déformation d'activation et de rupture en fonction des paramètres de sur-longueurs et de rupture, qui nous serviront plus tard dans l'algorithme :

$$t_i = \theta_i (1 + \lambda_i) \quad (5.10)$$

$$x_i = \theta_i (1 + \lambda_i) + \xi_i (1 + \theta_i)(1 + \lambda_i)$$

Les équations de bases étant écrites, il faut à présent définir un algorithme de résolution. Le plus évident consisterait à imposer un ensemble de valeur de déformation e et à recalculer la somme des efforts. Il y a cependant plus simple, en suivant l'algorithme utilisé par Chudoba *et al.* [79] :

- Nous assemblons trois vecteurs de couples déformation – effort, l'un avec les déformations d'activation et effort associé (\mathbf{t}), le suivant avec les déformations de ruptures et effort associé (\mathbf{x}^+) et le dernier avec les mêmes déformations de ruptures mais associées aux efforts transmis après la rupture du filament i (\mathbf{x}^-) :

$$\begin{aligned}\mathbf{t} &= [t_j, T_j(t_j)], \text{ avec } T_j(t_j) = \sum_{i=1}^{n_{\text{fibre}}} q_i(t_j) \\ \mathbf{x}^+ &= [x_j, T_j^+(x_j)], \text{ avec } T_j^+(x_j) = \sum_{i=1}^{n_{\text{fibre}}} q_i(x_j) \\ \mathbf{x}^- &= [x_j, T_j^-(x_j)], \text{ avec } T_j^-(x_j) = T_j^+(x_j) - q_i(x_j)\end{aligned}\tag{5.11}$$

- Le tracé de la courbe force-déformation s'effectue simplement en regroupant les trois vecteurs \mathbf{t} , \mathbf{x}^+ et \mathbf{x}^- et en triant par ordre croissant de déformation. Quand deux déformations sont identiques, le tri se fait par force décroissante.

Le modèle est mise en œuvre sous Matlab 2009b, avec la toolbox Statistics.

III. 3) Essais virtuels et campagne virtuelle

Le modèle de mèche précédent repose sur trois variables aléatoires :

- La contrainte à rupture des fibres qui suit une loi de Weibull, paramétrée par le facteur d'échelle $\sigma_{\text{max_fibre}}$ et le paramètre de forme $\lambda_{\text{Weibull fibre}}$ (cf. chapitre I §III.1.a) ;
- La différence de longueur de fibre prise dans le talon. Celle-ci sera prise comme une distribution uniforme entre 0 et λ_{max} ;
- La sur-longueur liée à l'ondulation et la désorientation des fibres.

Pour cette dernière, dans Chudoba *et al.* [79], des lois de distribution complexes sont prises en compte, permettant de représenter la prédominance des occurrences de petites et moyennes sur-longueurs par rapport aux grandes. Une telle fonction n'existant pas sous Matlab 2009b, une combinaison de deux distributions est réalisée, entre une fonction uniforme et une exponentielle, pour lesquelles il est défini :

- Une moyenne μ de l'exponentielle prise égale à θ_{moyen} ;
- Une valeur maximum de la loi uniforme prise égale à θ_{moyen} .

Ces trois lois permettent de représenter la variabilité entre les filaments au sein d'une même mèche. Le modèle de mèche est donc un échantillon virtuel.

Cependant, comme nous l'avons vu dans le paragraphe précédent lors de l'étude des essais de traction de la campagne 1, les paramètres des lois de distribution de sur-longueurs et de prise au talon sont eux-mêmes variables d'essais en essais.

Dans un premier temps, une procédure de campagne virtuelle est mise en œuvre, dans laquelle les paramètres des lois de distribution de sur-longueurs et de prise au talon varieront, suivant des lois uniformes. Nous recréons ainsi une campagne sur un ensemble d'échantillons virtuels, permettant d'atteindre la variabilité observée dans les campagnes réelles.

Les paramètres pilotant ces deux lois uniformes sont identifiés de façon déterministe sur les campagnes d'essais, sur un échantillon virtuel de référence, que l'on fait passer par la moyenne des courbes expérimentales. Nous pouvons ensuite lancer une campagne virtuelle, en effectuant des tirages aléatoires sur les paramètres des distributions de sur-longueurs et de prises au talon par échantillon (voir figure 5-23).

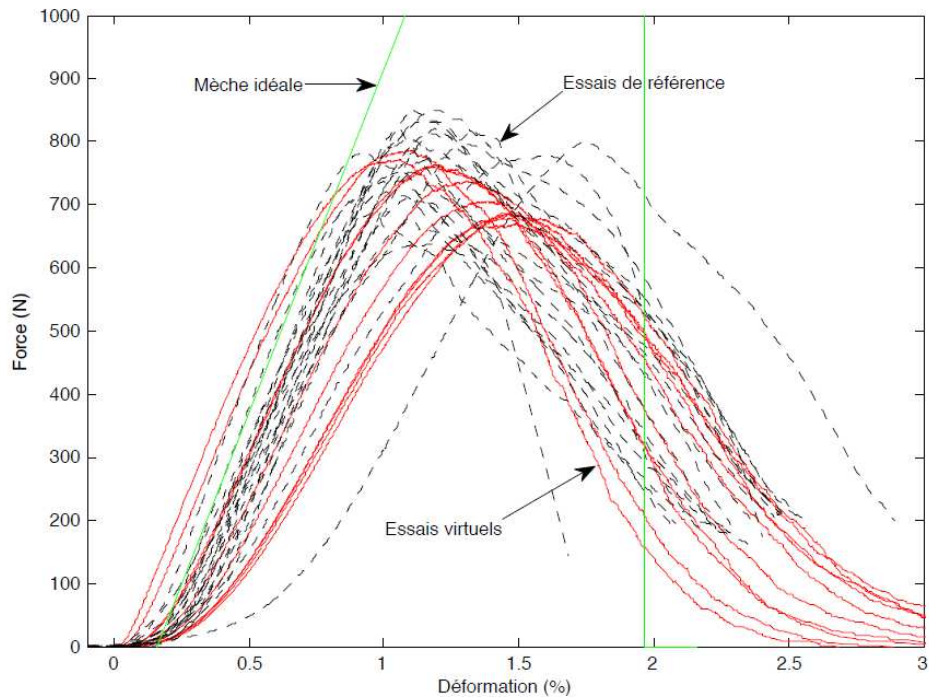


Figure 5-23 Campagne virtuelle avec tirages aléatoires des paramètres de sur-longueurs et de prise au talon et comparaison avec les essais sur mèche de référence

III. 3. a) Analyse de sensibilité

Afin de mieux appréhender le rôle de la sur-longueur et de la prise au talon, une étude de sensibilité succincte est présentée ici.

Dans un premier temps, le rôle de la prise au talon (λ_{\max}) est étudié. Nous faisons varier ce paramètre entre 1/70 et 10/70, ce qui correspond à une imprégnation de la mèche au niveau du talon de 1 mm à 10 mm. Les courbes obtenues sont présentées en figure 5-24. Nous noterons que les sur-longueurs sont désactivées ainsi que la variabilité de contrainte à rupture entre les fibres, et ceci dans l'objectif de ne caractériser qu'un seul paramètre.

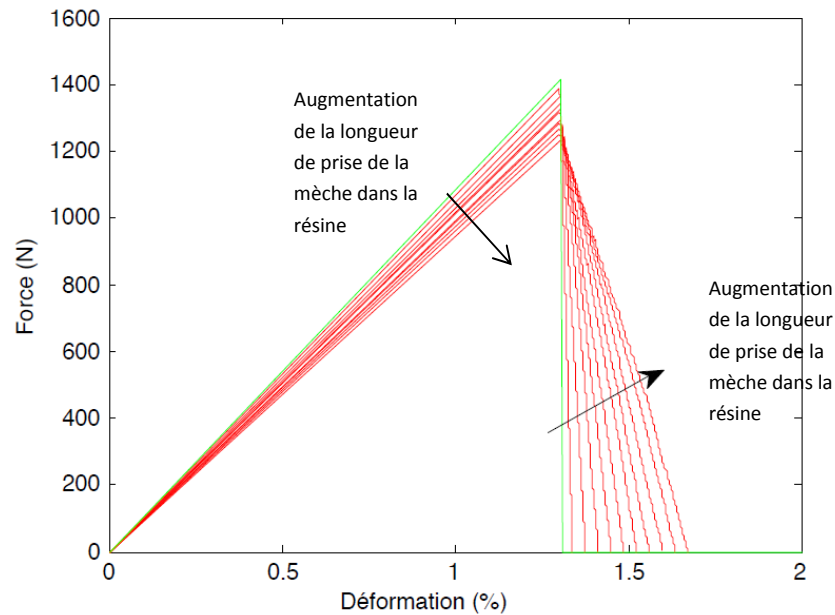


Figure 5-24 Influence de l'effet de la prise de la mèche dans le talon sur le modèle

L'augmentation de la longueur prise dans la résine fait chuter le module (car toutes les fibres ne sont pas chargées uniformément). La force maximale diminue car certaines fibres vont casser avant les autres. Cependant, pour des valeurs raisonnables, de moins de 5 mm, cet effet est négligeable. C'est pourquoi nous le laisserons à zéro pour la suite de l'étude.

A présent, l'effet de sur-longueur est étudié. Pour cela, les autres variabilités ne sont pas prises en compte. La sur-longueur moyenne varie entre 0.2/70 et 2/70 (soit des déformations d'activation entre 0.14 % et 2,8%). La figure 5-25 présente les résultats associés.

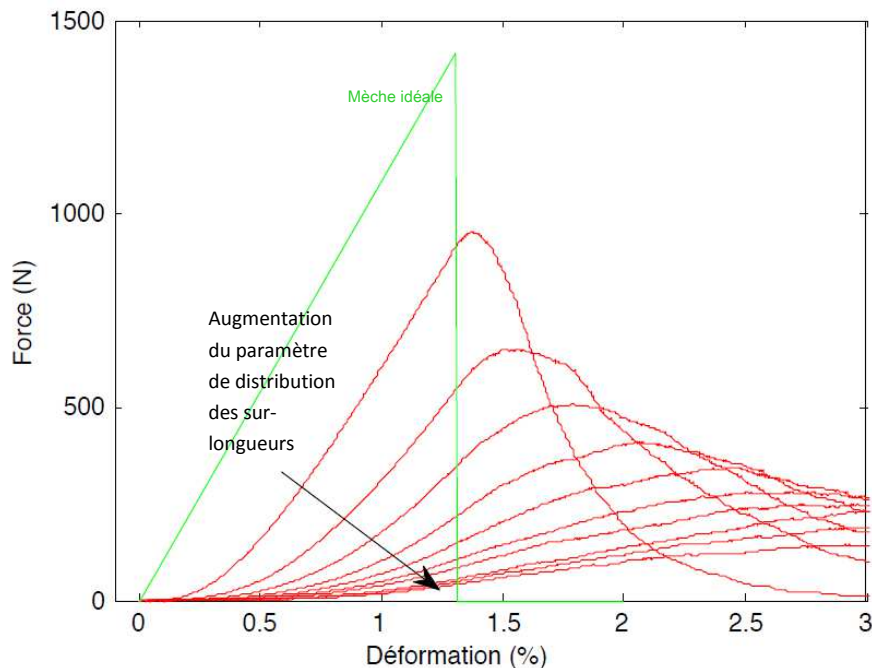


Figure 5-25 Influence de l'effet de la sur-longueur sur le modèle

Comme nous pouvons l'observer, la présence de sur-longueurs retarde la mise en tension de l'échantillon et diminue aussi le pic de force car des fibres vont casser avant même que certaines soient chargées. C'est un effet majeur pour bien représenter le comportement des mèches.

III. 3. b) Introduction d'un pré-endommagement

Les propriétés mécaniques des éprouvettes des différents lots de la campagne 1 s'écartent des propriétés de la mèche idéale avant même l'endommagement sur mesure. En effet, contrairement à la mèche théorique idéale, les filaments qui constituent les mèches réelles ne sont pas réellement infinis, mais bien de longueur finie. De plus, des défauts sont préexistants sur les filaments. L'introduction de ce « pré-endommagement » dans le modèle peut se faire de deux façons :

- Par la modification de la distribution de défauts. Il faudrait alors pouvoir piloter les paramètres de la loi de Weibull, voire la modifier pour représenter l'apparition de défauts supplémentaires. Cette approche nécessite une bonne connaissance de la distribution de défauts au sein des filaments constituant la mèche ;
- Par rupture de fibres au préalable de l'essai virtuel. Pour ce faire, un tirage aléatoire des fibres qui vont casser est réalisé.

C'est cette dernière solution qui a été adoptée ici car elle est facile à mettre en œuvre. Bien entendu, le nombre de filaments initialement cassés étant différents d'une éprouvette à l'autre, dans la procédure de campagne virtuelle, nous ferons varier ce nombre suivant une loi normale, pour laquelle on pilote la moyenne n_{rompu} et l'écart type σ_{rompu} .

III. 3. c) Procédure d'identification sur la base des essais de références

Le modèle mis en place possède un nombre important de paramètres, que nous pouvons séparer en trois groupes :

- Les paramètres « matériaux », indépendants des essais, que nous n'identifierons qu'une seule fois :
 - La distribution de Weibull des contraintes à rupture des fibres ;
 - Le module et la section par fibre, qui sont considérés comme constants et pris sur la base des données fournisseur (voir table 4-1) ;
 - La distribution de filaments « pré-endommagés » ;
- Les paramètres « structuraux », liés aux éprouvettes, et à ré-identifier pour chaque campagne :
 - La distribution des allongements d'activation ;
 - La distribution des sur-longueurs de fibres ;
- Les paramètres d'endommagement (pour les campagnes autres que la référence) :
 - La distribution de filaments rompus.

La procédure d'identification suivie sur les essais de référence est la suivante :

- Concernant la non-homogénéité du talon, suite à l'étude de sensibilité précédemment réalisée, une valeur de 1/70 a été choisie, ce qui correspond à une imprégnation des fibres sur 1 mm. Une analyse micrographique au niveau d'un talon permettrait d'affiner cette valeur ;

- Identification des paramètres de la distribution d'allongement d'activation sur la non-linéarité initiale des courbes force-déformation. En effet, celle-ci est assez indépendante des autres paramètres. Entre les différents lots, seul le paramètre d'échelle sera ré-identifié et non pas la pondération entre les distributions exponentielle et normale. Ici, le paramètre de sur-longueur est identifié à 0,2%.

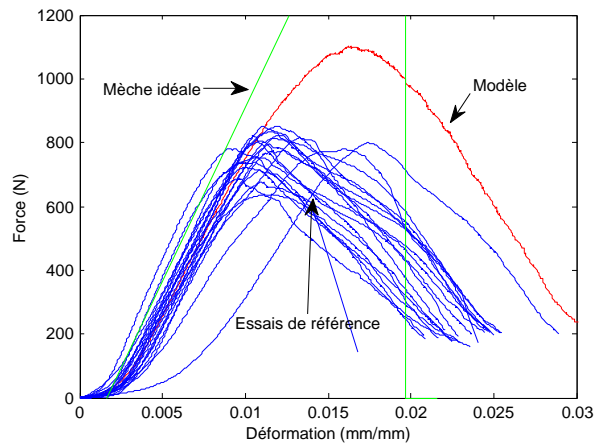


Figure 5-26 Modèle avec paramètre de sur-longueur = 0,2%

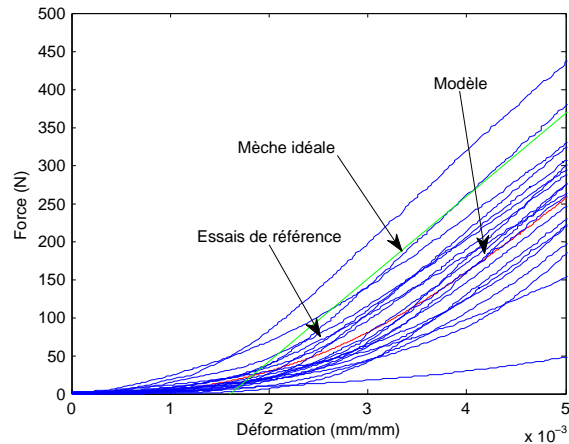


Figure 5-27 Zoom sur la zone de mise en tension

- Identification de la distribution de Weibull pour les contraintes à rupture. En l'absence de données statistiques sur la fibre AS7, il a été choisi de se baser sur les valeurs d'une fibre proche en caractéristiques : la fibre T700 [88]. Dans celle-ci, nous remarquons que le paramètre d'échelle de la loi de Weibull correspond à environ 84% de la contrainte à rupture fournisseur. De plus, un facteur de forme, correspondant à la dispersion des défauts est donné à 24. Initialement il est pris comme paramètre d'échelle 80% de la contrainte à rupture fibre du fournisseur, ainsi qu'un paramètre de forme de 20. Or, ces paramètres conduisent à une large surestimation de la force à rupture, comme nous pouvons le voir sur la figure 5-28.

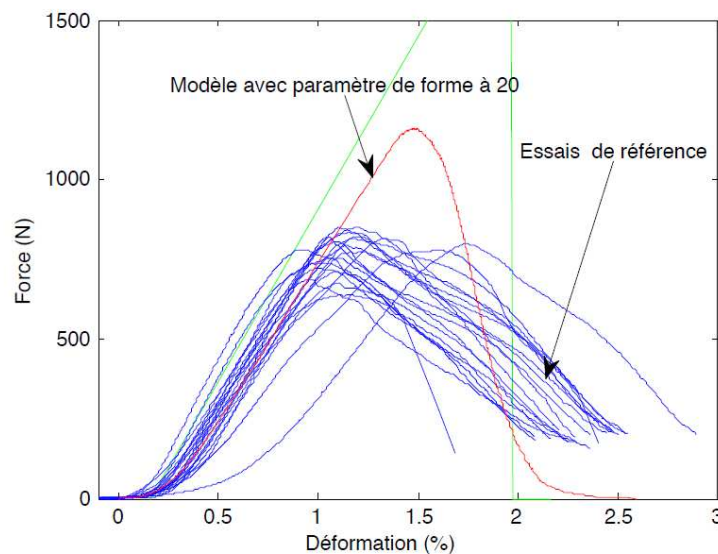


Figure 5-28 Modèle initial avec une hypothèse à 80% de la contrainte à rupture fournisseur et paramètre de forme à 20

L'identification inverse des paramètres d'entrée, a permis d'aboutir au choix suivant :

$\sigma_{\max_fibre} = 3477\text{MPa}$ et $\lambda_{\text{weibull fibre}} = 3,2$. Ce dernier peut sembler faible, car on ne s'attend pas à avoir une aussi forte dispersion des contraintes à rupture pour des fibres de carbone : d'où la nécessité d'avoir des valeurs de référence pour la distribution des défauts inhérents à la fibre AS7.

Sur la figure 5-29, nous constatons que le modèle modifié suit bien le comportement des éprouvettes de référence.

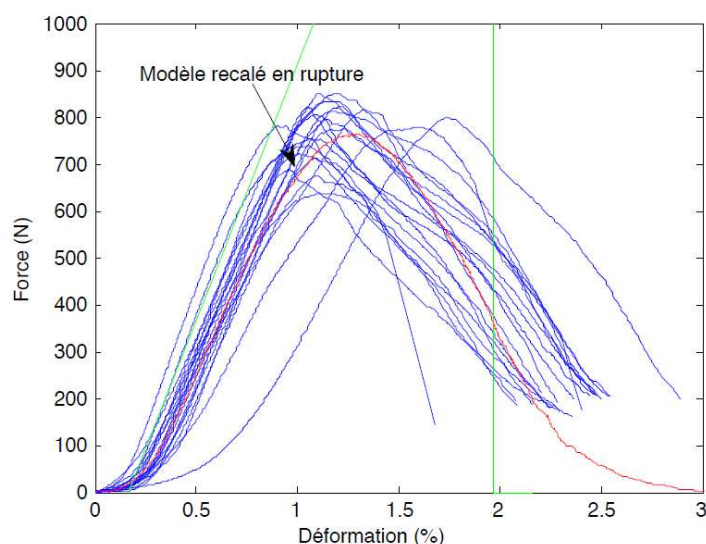


Figure 5-29 Modèle modifié avec $\sigma_{\max_fibre} = 3477\text{MPa}$ et $\lambda_{\text{Weibull fibre}} = 3,2$

Les paramètres fixes retenus pour le modèle sont résumés en table 5-3.

Paramètre de distribution de sur-longueur	Facteur d'échelle de la distribution de contrainte à rupture	Facteur de forme de la distribution de contrainte à rupture
0.002 mm/mm	3477 MPa	3.2

Table 5-3 Paramètres du modèle

A présent, il est possible de créer une campagne virtuelle, en effectuant des tirages aléatoires des paramètres de sur-longueur et d'imprégnation au talon. Nous obtenons alors, pour une campagne virtuelle de 10 essais les résultats présentés en figure 5-30.

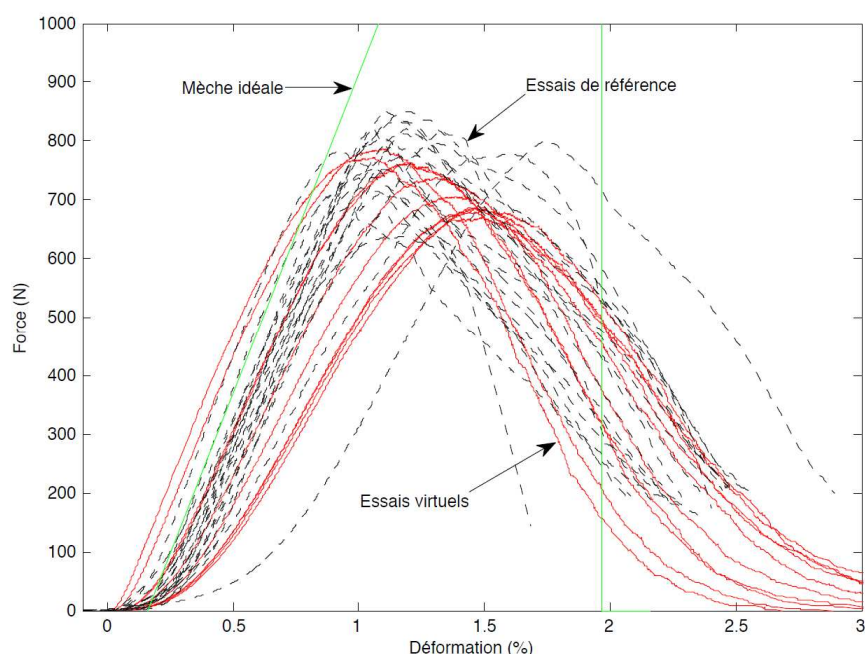


Figure 5-30 Campagne virtuelle de 20 essais virtuels

III. 3. d) Etude des lots 1 à 8 de la campagne 1 à l'aide du modèle

Comme on peut le voir sur la figure 5-30, la campagne virtuelle reproduit relativement bien le comportement du lot de référence. A présent, il est appliqué aux 8 lots de la campagne 1. Pour ce faire, la statistique de rupture fibre reste inchangée. Seuls les paramètres de sur-longueur et le nombre de fibres rompues sont ré-identifiés pour chaque lot.

III. 3. d. (i) Lot 1

L'adaptation initiale du modèle aux éprouvettes du lot 1 permet d'obtenir les paramètres rappelés en table 5-4. De plus, en faisant varier le nombre de filaments rompus, nous pouvons obtenir les bornes qui permettent de reproduire l'ensemble des courbes du lot, comme montré sur la figure 5-31.

Paramètre de distribution de sur-longueur	Nombre de filaments rompus moyen	Min de filaments rompus	Max de filaments rompus
0,3%	1000	0	1300

Table 5-4 Paramètres du modèle adapté au lot 1

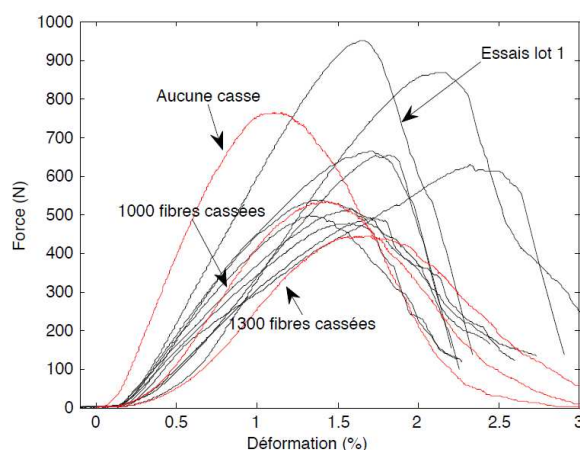


Figure 5-31 Campagne 1 - Lot 1 : Comparaison des essais avec le modèle pour différents nombres de filaments rompus

Nous notons une forte variabilité de la casse initiale de fibre. De plus, le modèle ne permet pas d'atteindre les forces les plus élevées, sans modifier les autres paramètres (prise au talon, statistique de rupture).

III. 3. d. (ii) Lot 2

La procédure est répétée pour le lot 2, dont les résultats sont présentés ici. Les paramètres du modèle qui ont été modifiés pour s'adapter au lot 2 sont présentés en table 5-5.

Paramètre de distribution de sur-longueur	Nombre de filaments rompus moyen	Min de filaments rompus	Max de filaments rompus
0,15%	1700	1000	2300

Table 5-5 Paramètres du modèle adapté au lot 2

Les courbes superposées de la mèche théorique, des courbes expérimentales et des courbes du modèle sont disponibles en figure 5-32.

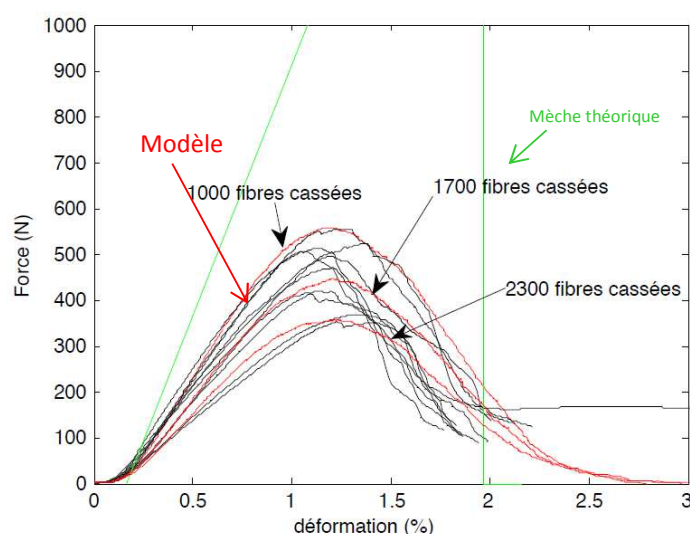


Figure 5-32 Campagne 1 - Lot 2 : Comparaison des essais avec le modèle pour différents nombres de fibres rompus

La variation du nombre de filaments rompus, de 1000 à 2300 permet de bien encadrer l'ensemble des courbes expérimentales. Les valeurs de modules en traction et d'effort à rupture sont bien respectées.

III. 3. d. (iii) Lot 3

La procédure est répétée pour le lot 3, dont les résultats sont présentés ci-après. Les paramètres du modèle qui ont été modifiés pour s'adapter au lot 3 sont donnés en table 5-6.

Paramètre de distribution de sur-longueur	Nombre de filaments rompus moyen	Min de filaments rompus	Max de filaments rompus
0,1%	1300	300	2300

Table 5-6 Paramètres du modèle adapté au lot 3

Les courbes superposées de la mèche théorique, des courbes expérimentales et des courbes du modèle sont disponibles en figure 5-33.

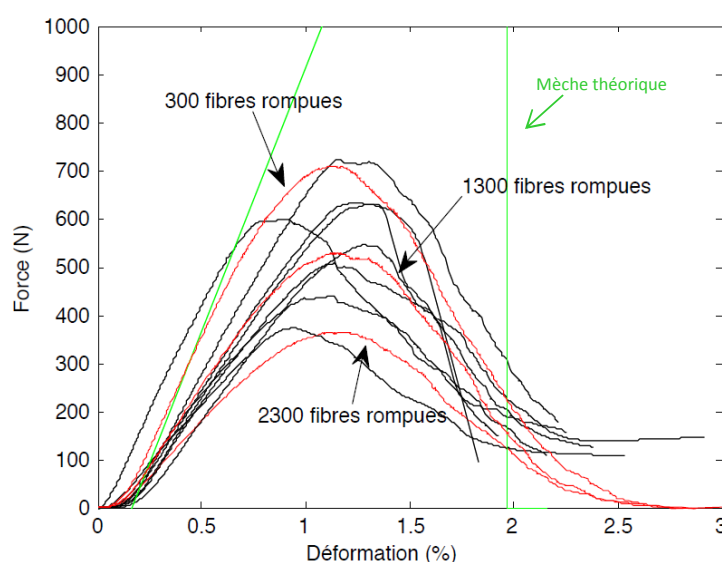


Figure 5-33 Campagne 1 - Lot 3 : Comparaison des essais avec le modèle pour différents nombres de fibres rompues

Nous pouvons remarquer que malgré la forte dispersion des courbes expérimentales, en variant le nombre de filaments rompus, de manière très large, de 300 à 2300, le modèle arrive à reproduire l'ensemble du lot en termes de module en traction, mais aussi en ce qui concerne la valeur de l'effort à rupture.

III. 3. d. (iv) Lot 4

La procédure est répétée pour le lot 4, dont les résultats sont présentés ci-après. On peut voir en table 5-7 que seul le paramètre de distribution des sur-longueurs a dû être modifié pour s'adapter aux courbes du lot 4.

Paramètre de distribution de sur-longueur	Nombre de filaments rompus moyen	Min de filaments rompus	Max de filaments rompus
0,12 %	0	N/A	N/A

Table 5-7 Paramètres du modèle adapté au lot 4

Les courbes superposées de la mèche théorique, des courbes expérimentales et de la courbe du modèle sont disponibles en figure 5-34.

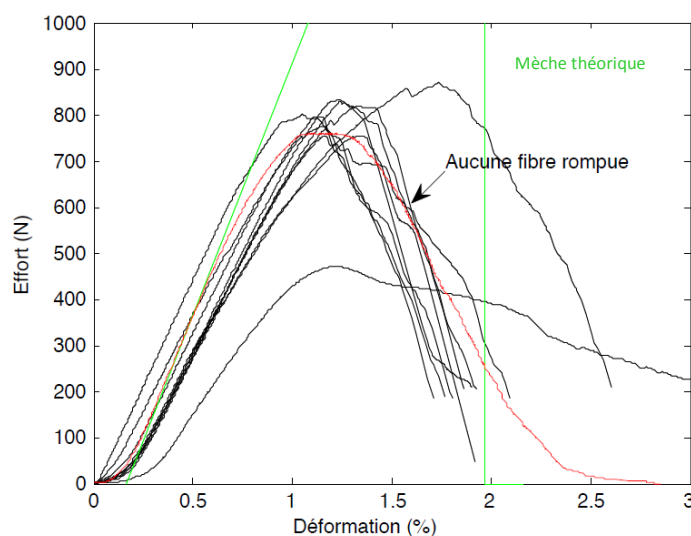


Figure 5-34 Campagne 1 - Lot 4 : Comparaison des essais avec le modèle pour différents nombres de fibres rompues

Les courbes expérimentales étant très peu dispersées (à l'exception d'une qui s'écarte très franchement des autres), le modèle reproduit correctement le comportement moyen des éprouvettes du lot, sans pour autant reproduire leur comportement morphologique dans la mesure où le nombre de filaments rompus est nul.

III. 3. d. (v) Lot 5

La procédure est répétée pour le lot 5, dont les résultats sont présentés ici. On peut voir en table 5-8 que, comme pour le lot 4, seul le paramètre de distribution des sur-longueurs a été modifié pour s'adapter aux courbes du lot 5.

Paramètre de distribution de sur-longueur	Nombre de filaments rompus moyen	Min de filaments rompus	Max de filaments rompus
0,1%	0	N/A	N/A

Table 5-8 Paramètres du modèle adapté au lot 5

Les courbes superposées de la mèche théorique, des courbes expérimentales et de la courbe du modèle sont disponibles en figure 5-35.

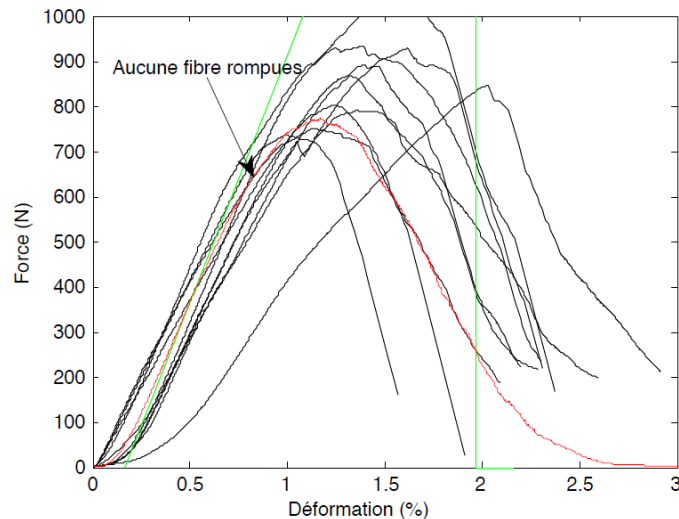


Figure 5-35 Campagne 1 - Lot 5 : Comparaison des essais avec le modèle

Le modèle n'est ici pas capable de reproduire la force maximale, bien que très proche, sans que l'on modifie les paramètres fixes du modèle. En effet, la variation du nombre de filaments rompus ne permet pas d'atteindre les efforts à rupture, plus élevés dans le cas des courbes expérimentales. Nous noterons de plus que le module est légèrement plus rigide dans le cas du modèle par rapport aux essais. Cela est sans doute lié à la distribution des sur-longueurs, qui devrait, dans ce cas, privilégier les plus grandes longueurs (pour rappel, la loi de distribution des sur-longueurs est une combinaison de deux distributions, entre une fonction uniforme et une fonction exponentielle, de manière à privilégier les petites et moyennes sur-longueurs).

III. 3. d. (vi) Lot 6

La procédure est répétée pour le lot 6, dont les résultats sont présentés ici. On peut voir en table 5-9 que, comme pour les lots 4 et 5, seul le paramètre de distribution des sur-longueurs a été modifié pour s'adapter aux courbes du lot 6.

Paramètre de distribution de sur-longueur	Nombre de filaments rompus moyen	Min de filaments rompus	Max de filaments rompus
0,1%	0	N/A	N/A

Table 5-9 Paramètres du modèle adapté au lot 6

Les courbes superposées de la mèche théorique, des courbes expérimentales et de la courbe du modèle sont disponibles en figure 5-36.

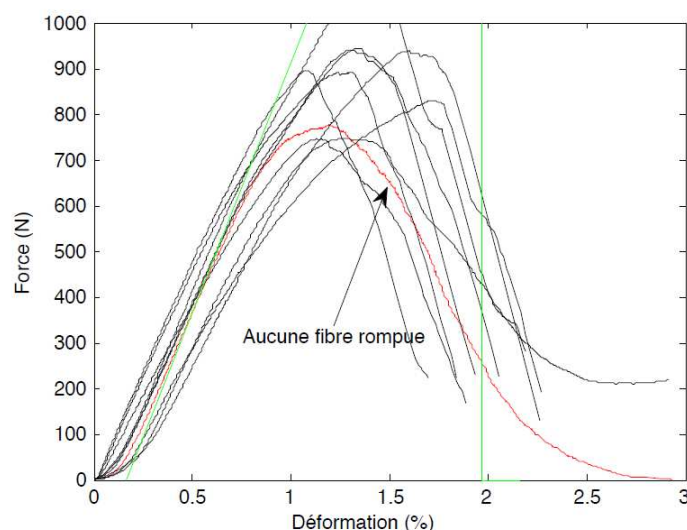


Figure 5-36 Campagne 1 - Lot 6 : Comparaison des essais avec le modèle

De même que pour le lot 5, le modèle n'est pas capable de reproduire la force maximale, bien que très proche, sans que l'on modifie les paramètres fixes du modèle. La variation du nombre de filaments rompus ne permet en effet pas d'atteindre les efforts à rupture plus élevés dans le cas des courbes expérimentales.

III. 3. d. (vii) Lot 7

La procédure est répétée pour le lot 7, dont les résultats sont présentés ici. On peut voir en table 5-10 que, comme pour les lots 4, 5 et 6, seul le paramètre de distribution des sur-longueurs a été modifié pour s'adapter aux courbes du lot 7.

Paramètre de distribution de sur-longueur	Nombre de filaments rompus moyen	Min de filaments rompus	Max de filaments rompus
0.001 mm/mm	0	N/A	N/A

Table 5-10 Paramètres du modèle adapté au lot 7

Les courbes superposées de la mèche théorique, des courbes expérimentales et de la courbe du modèle sont disponibles en figure 5-37.

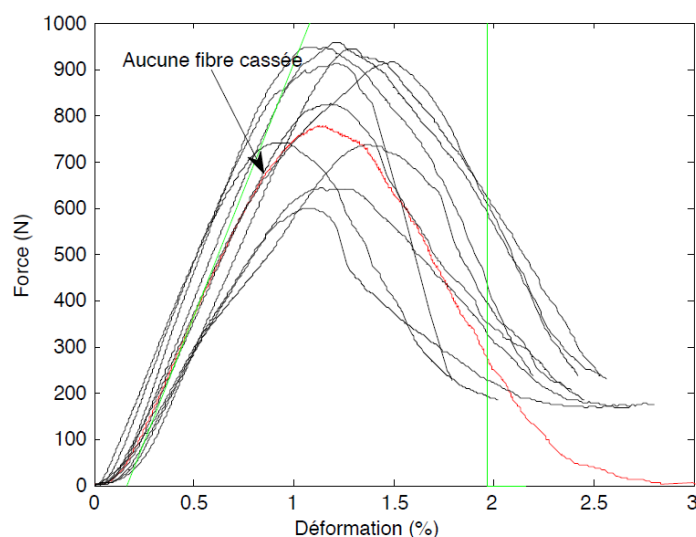


Figure 5-37 Campagne 1 - Lot 7 : Comparaison des essais avec le modèle

Nous pouvons remarquer, comme pour les lots précédents, que les valeurs expérimentales d'effort à rupture et de module en traction sont supérieures à celles du modèle, même en considérant qu'aucun filament n'est rompu.

III. 3. d. (viii) Lot 8

La procédure est répétée pour le lot 8, dont les résultats sont présentés ici. On peut voir en table 5-11 que seul le paramètre de distribution des sur-longueurs a été modifié pour s'adapter aux courbes du lot 8.

Paramètre de distribution de sur-longueur	Nombre de filaments rompus moyen	Min de filaments rompus	Max de filaments rompus
0.0005 mm/mm	0	N/A	N/A

Table 5-11 Paramètres du modèle adapté au lot 8

Les courbes superposées de la mèche théorique, des courbes expérimentales et de la courbe du modèle sont disponibles en figure 5-38.

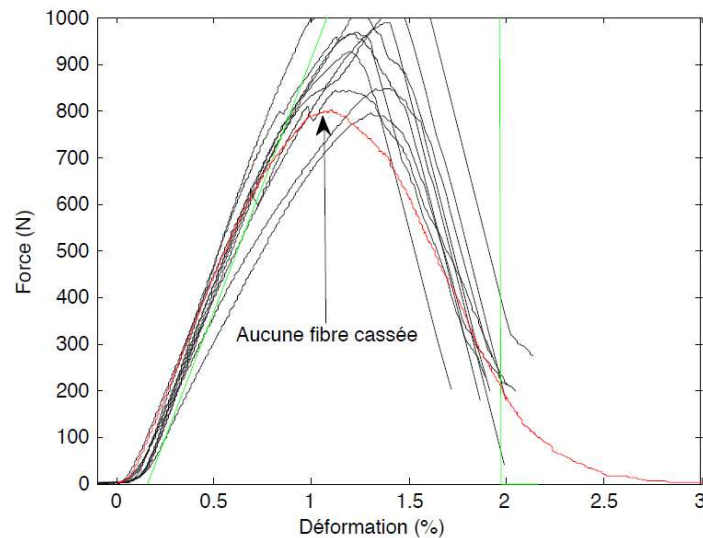


Figure 5-38 Campagne 1 - Lot 8 : Comparaison des essais avec le modèle

Comme pour les lots précédents, les valeurs expérimentales d'effort à rupture sont supérieures à celles du modèle, même avec un nombre de filament rompu nul. Le modèle reproduit cependant assez bien les valeurs expérimentales de module en traction.

III. 4) Bilan de l'application du modèle

Pour cette première approche, le modèle proposé permet en partie de rendre compte du comportement des mèches et de leur rupture, en tenant compte des variabilités (sur-longueur, prise au talon, contrainte à rupture des fibres). Cependant, comme nous l'observons sur les lots 5 à 8, les paramètres du modèle fixés en se basant sur les essais de référence ne permettent pas d'atteindre les forces à rupture et donc d'estimer l'endommagement potentiel des mèches. Cette limitation du modèle à rendre compte des phénomènes observés peut s'expliquer en partie par :

- La distribution de contrainte à rupture qui n'est sans doute pas correcte (le paramètre de forme étant vraiment bas, 3,2 contre 20 dans la littérature sur des fibres carbone). En effet, l'hypothèse qui a été faite ici est que les mèches de référence, n'ayant jamais été retordues, les interactions inter-filamentaires pouvaient être négligées. Cette hypothèse est un cas idéal, sur lequel l'estimation de la distribution de résistance avait un sens. Nous remarquons bien sur l'étude du lot 8 qu'en prenant comme paramètre de forme 20, le modèle s'ajuste mieux aux données expérimentales. Cependant, cette valeur ne convient pas pour les essais de référence, comme représenté sur la figure 5-39 et la figure 5-40. Cela démontre bien que le paramètre de forme ne peut pas être considéré comme constant selon que la mèche soit saine ou endommagée. Il faut donc probablement inclure dans le modèle un tirage aléatoire, modulant ce facteur de forme, pour tenir compte de l'effet de l'endommagement.
- L'estimation de la distribution de contrainte à rupture de manière robuste et indépendante améliorerait largement la fiabilité du modèle et permettrait de se concentrer sur d'autres phénomènes et sources de variabilité pour expliquer la rupture des échantillons de référence et modéliser le comportement des mèches endommagées.

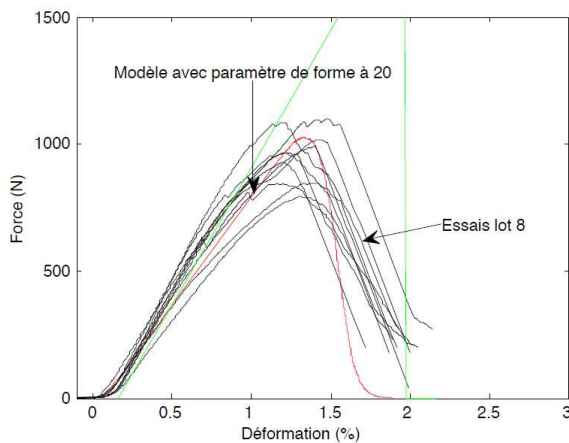


Figure 5-39 Modèle avec paramètre de forme =20, comparé aux essais du lot 8

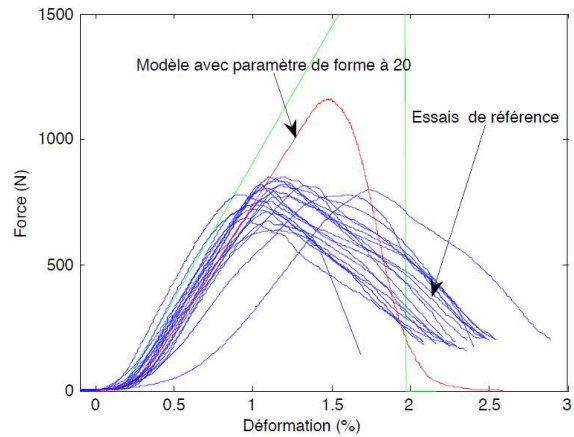


Figure 5-40 Modèle avec paramètre de forme=20, comparé aux essais sur mèche de référence

- L'absence d'interaction entre fibres. En effet, au regard des éléments précédents, il semble qu'il y ait d'autres phénomènes à prendre en compte pour expliquer la rupture des échantillons, et notamment celles dont les forces à rupture sont supérieures à la référence. Compte tenu des éléments déjà présents dans le modèle, l'interaction entre filaments semble être le seul phénomène non pris en compte pour le moment. Cette interaction peut être de deux types :
 - Les frottements entre fibres, qui permettent à une fibre rompue à un endroit de faire supporter la charge à une autre. Nous obtenons donc un réseau de ruptures plus complexe mais permettant sans doute de supporter davantage de charge ;
 - A contrario, trop de cohésion dans le toron peut aussi entraîner la propagation directe de la rupture d'une fibre à ses voisines, abaissant ainsi la performance de la mèche. Cependant, un tel phénomène rendrait plus fragile son comportement mécanique, ce qui n'est pas observé sur les essais de référence.

Ainsi, le modèle proposé ne permet pas encore d'expliquer l'ensemble des phénomènes observés sur les 8 lots étudiés, et notamment l'amélioration apparente des propriétés mécaniques liée à certains types d'endommagement. Ces derniers peuvent en effet aboutir à une mèche, exempte de filaments faibles mécaniquement, ceux-ci ayant été rompus lors de l'endommagement, laissant ainsi une mèche plus compacte, dont la dispersion des contraintes d'activation est plus réduite.

Nous pouvons cependant rassembler l'ensemble des observations dans un tableau unique et voir si un lien semble se dégager entre indicateurs mécaniques et morphologiques. La table 5-12 rappelle l'ensemble des observations.

Nous constatons bien qu'il n'y a pas de lien entre l'indicateur morphologique de surface de filaments rompus et le paramètre du modèle de nombre de filaments rompus.

Chapitre V – Recherche d'un modèle d'ajustement

Lot	Matériaux	Rayon	Angle d'atta- que	Nombre de cycles	Déformation d'activation	Comportement à rupture (%) / Essais de ref	Paramètre de sur- longueur	Fibres pré-cassées			Reprodu- ctibilité du modèle	Indicateur surface carbone	Indicateur surface mèche	Indicateur surface de filaments rompus	Largeur mèche (mm)	
					Min ; Max ; Moyenne			Moy	Min	Max					Moy	Ecart type
REF					0.2 ; 0.8 ; 0.4	Progressif (1%)	0,002	0	N/A	N/A	OK					
L1	Alumine	R1	45°	1	0.2 ; 0.65 ; 0.3	Plus fragile (0.8%)	0,003	1000	0	130 0	OK	2,50E+07	2,50E+07	124	5,42	0,23
L2	Alumine	R2	45°	10	0.2 ; 0.4 ; 0.3	Plus fragile (0.8%)	0	1 700	1 000	2 300	OK	1,23E+07	1,23E+07	6 855	2,92	1
L3	Titanate	R2	45°	1	0.1 ; 0.3 ; 0.2	Progressif (1%)	0,001	1300	300	230 0	OK	1,42E+07	1,42E+07	176	2,97	0,25
L4	Titanate	R1	45°	10	0.02 ; 0.5 ; 0.2	Plus fragile (0.7%)	0,0012	0	N/A	N/A	OK	1,17E+07	1,17E+07	6 414	2,64	0,55
L5	Alumine	R2	30°	1	0,025 ; 0,6 ; 0,3	Progressif (1%)	0,001	0	N/A	N/A	NOK	2,14E+07	2,14E+07	109	4,57	0,28
L6	Titanate	R2	30°	10	0.01 ; 0.35 ; 0.15	Beaucoup plus fragile (0.6%)	0,001	0	N/A	N/A	NOK	9,99E+06	9,99E+06	458	3,02	0,69
L7	Titanate	R1	30°	1	0.025 ; 0.3 ; 0.15	Progressif (0.9%)	0,001	0	N/A	N/A	NOK	9,82E+06	9,82E+06	166	2,13	0,22
L8	Alumine	R1	30°	10	0.025 ; 0.25 ; 0.12	Beaucoup plus fragile (0.6%)	0,0005	0	N/A	N/A	NOK	7,01E+06	7,01E+06	194	1,52	0,19

Table 5-12 Ensemble des observations entre le modèle développé et les résultats expérimentaux

Conclusion du chapitre V

Comme nous l'avons constaté, il n'existe pas de corrélation simple entre indicateurs morphologiques et paramètres mécaniques. Cette première conclusion peut trouver son origine dans la manière d'obtenir les réponses mécaniques et morphologiques, qui présente une part d'erreur systématique et aléatoire. Pour valider cette hypothèse sur l'aspect mécanique, un modèle a été mis en place, afin de caractériser l'influence des paramètres structuraux, matériaux, et ceux liés à l'endommagement.

Le modèle utilisé n'a pas permis d'appréhender l'ensemble des phénomènes caractérisant le comportement en traction de la mèche de carbone endommagée. Afin d'améliorer la corrélation entre le modèle et les données expérimentales, plusieurs études sont à envisager :

- La caractérisation complète de la santé-matière de la fibre (identification des défauts pertinents et leur distribution) sur mèche saine ;
- L'analyse de l'influence de l'endommagement sur mesure sur les défauts pertinents et leur distribution statistique ;
- La compréhension et la quantification des erreurs systématique et aléatoire produites lors de l'acquisition des réponses mécaniques et morphologiques, non mis en évidence par la méthode développée durant ces travaux de thèse ;
- L'intégration des phénomènes inter-filamentaires, tels que les frottements entre fibres ;
- L'augmentation des populations testées (configurations supplémentaires) augmenterait le taux de confiance des données expérimentales recueillies, et par voie de conséquence la pertinence de la corrélation.

Conclusion et perspectives

Dans le contexte actuel d'augmentation des exigences quant aux performances tant économiques qu'écologiques des pièces aéronautiques, les matériaux composites offrent des solutions prometteuses. Afin d'étendre et de pérenniser leur utilisation, il est nécessaire d'améliorer les connaissances associées à ces matériaux et à leurs procédés de fabrication.

Cette thèse a été financée par la société Aircelle, groupe Safran, dans le but d'identifier les facteurs de dégradation des mèches de carbone au cours du procédé de fabrication des préformes tissées pour les matériaux composites. Pour répondre à cette problématique, deux méthodes de caractérisation ont été évaluées. La première est une technique de caractérisation mécanique par essai de traction. La seconde est une méthode non-destructive par analyse d'images.

L'endommagement des matériaux composites est un phénomène multi-échelles. Dans le cadre de ces travaux, l'échelle d'étude est celle de la mèche, considérée comme un ensemble de filaments. Le périmètre de l'étude retenue concerne la vie d'une mèche utilisée comme fil de chaîne, et va de la bobine fournisseur, jusqu'au point de tassage, c'est-à-dire s'arrête avant la formation du tissu.

Dans le premier chapitre, une revue de la littérature concernant la fibre de carbone, sa morphologie et ses propriétés, a été présentée. Le procédé de fabrication a été détaillé, de manière à expliquer l'influence notamment des étapes de traitement thermique sur ses caractéristiques. D'autres éléments clés pour le comportement de la mèche tels que l'ensimage ont également été présentés. Les principaux procédés de transformation textile, qui permettent de passer de la mèche à la préforme, ont ensuite été répertoriés, en mettant l'accent sur l'endommagement qu'ils occasionnent sur les mèches de carbone. Enfin, une revue des techniques permettant de quantifier cet endommagement à différentes échelles a été exposée.

Dans le deuxième chapitre, une méthode d'analyse de risques transposée au risque d'endommagement de la mèche dans le contexte du procédé de tissage a permis de mettre en évidence les étapes et les paramètres potentiellement critiques pour la santé-matière de la mèche. Des choix ont alors été faits, basés sur l'état de l'art et sur les pratiques actuelles, pour associer des valeurs aux paramètres identifiés. Enfin, la réalisation d'un plan d'expérience a permis d'organiser au mieux et de réduire le nombre d'essais à mener.

Dans le troisième chapitre, le banc de test développé dans le cadre de ces travaux a été présenté. Il permet de modéliser expérimentalement les paramètres d'endommagement précédemment identifiés, réalisant ainsi des mèches « dégradées sur mesure ». Les critères de cet endommagement ont ensuite été définis, au sens mécanique, mais aussi au sens morphologique. Des protocoles ont été mis en place afin de mesurer ces critères. Un logiciel d'analyse d'images a notamment été créé. Il permet de recueillir plusieurs indicateurs morphologiques de l'endommagement. Un

protocole d'essai de traction sur mèche sèche a aussi été développé, afin de ne pas perturber la mesure par la présence de résine (essai de traction sur mèche imprégnée).

Dans le quatrième chapitre, les résultats de ces caractérisations ont été présentés pour chaque campagne. Cela a permis de dresser une première cartographie des paramètres de tissage optimaux, mais également de quantifier l'influence sur les propriétés mécaniques et morphologiques des variations de ces paramètres. Une campagne où les paramètres optimaux et minimaux ont été cumulés a permis de mettre en lumière l'impact de « l'historique » de l'endommagement sur la mèche de carbone.

Dans le cinquième chapitre, une étude de corrélation a été menée mais n'a pas permis de conclure quant à une relation simple entre les indicateurs mécaniques et morphologiques. Afin de mieux comprendre le lien entre les indicateurs mécaniques et les indicateurs morphologiques, un modèle a été développé afin de recréer virtuellement les courbes de traction obtenues expérimentalement. Pour cela, l'impact de grandeurs mécaniques influentes sur le modèle, telles que le désalignement, les sur-longueurs, et le nombre de filaments cassés, a été évalué. Leurs valeurs ont été déterminées de manière à ce que le modèle soit capable de reproduire le comportement en traction des mèches de référence, c'est-à-dire les mèches saines, issues de la bobine fournisseur. Le modèle ainsi construit a ensuite été confronté aux éprouvettes des différents lots de la campagne 1. Les résultats sont mitigés puisque le modèle permet de suivre le comportement de la moitié des lots, mais les taux de filaments rompus ne correspondent pas entre le modèle et les données fournies par la caractérisation morphologique.

Une des pistes de développement futur consisterait à augmenter le nombre de configurations testées dans chaque campagne. En effet, le choix qui a été fait dans le cadre de cette thèse est celui d'un criblage des différents paramètres, le but étant d'identifier les paramètres les plus influents sur l'ensemble du procédé. Cela étant fait, il faudrait maintenant se concentrer sur une campagne en particulier, et augmenter le nombre de facteurs et de niveaux associés, afin d'avoir davantage de points à comparer pour les différents indicateurs. Dans cet esprit, l'étude d'un nombre de cycles plus important – 100 cycles par exemple – permettrait d'amplifier le comportement de la mèche, tout en restant réaliste, puisque dans le cas du tissage volumique, le nombre élevé de couches tissées entraîne de très nombreux allers-retours de la mèche à travers les différents éléments de guidage, avant d'être tissée.

D'autre part, il serait intéressant d'améliorer le procédé d'acquisition d'images, et notamment la technique d'éclairage, afin de pouvoir exploiter l'indicateur de désorientation, qui donnerait une information majeure sur le lien entre l'endommagement, la torsion engendrée, et l'effet sur les propriétés mécaniques de la mèche. En effet, dans le modèle de comportement de la mèche en traction, cet aspect a été négligé, considérant par hypothèse que la mèche étudiée était plate. Or, il est apparu lors des essais qu'un phénomène de fausse torsion pouvait survenir. Il est donc indispensable d'introduire les frottements inter-filamentaires dans le modèle pour potentiellement pouvoir expliquer l'évolution de l'indicateur mécanique. Il serait également utile de collecter des données d'entrée matériaux pertinents, et de s'assurer qu'avec de tels paramètres, le modèle développé corrèle bien avec les résultats expérimentaux.

La compréhension des phénomènes mis en jeu lors des essais de traction sur mèche sèche est en effet centrale. Une étude de la distribution des défauts à l'échelle des filaments est indispensable

pour alimenter le modèle développé. Pour cela, des campagnes d'essais de traction sur monofilaments couplés à l'observation des faciès de rupture, sont à envisager.

L'amélioration du procédé de caractérisation mécanique est capitale pour réduire la dispersion des mesures. Par exemple, l'utilisation d'un capteur de force dont la gamme serait plus resserrée (10kN dans cette étude) permettrait d'améliorer nettement la précision des valeurs obtenues. Une autre piste consisterait à utiliser des techniques de mesure sans contact, afin de s'affranchir d'un certain nombre d'incertitudes expérimentales liées au montage. Il serait également judicieux de travailler sur la forme du talon (dans cette étude, rectangulaire) et sur la manière de prélever et de manipuler les échantillons, pour permettre une meilleure reproductibilité de la fabrication des éprouvettes de traction. Afin de mesurer l'efficacité de ces changements, des campagnes de mesure de la dispersion sur des lots de références sont à envisager. Une étude est également à mener sur l'influence de la longueur de jauge sur les résultats, afin de valider les valeurs moyennes obtenues dans la littérature.

De façon à valider les techniques de caractérisation développées ici, il est nécessaire de corrélérer les indicateurs obtenus avec d'autres techniques. Pour la caractérisation par analyse d'images, la tomographie à rayons X, permettrait de vérifier que les indicateurs surfaciques fournis sont bien pertinents dans la mesure où les filaments au cœur de la mèche sont intacts. De même, comme ce qui a été fait récemment par Barbulée *et al.* [89] sur des mèches de lin, des essais de traction suivis par des capteurs d'émission acoustique permettraient d'apporter de la précision au modèle de comportement mécanique développé et d'améliorer la compréhension du lien entre les indicateurs mécaniques et morphologiques.

Enfin, une des perspectives à ces travaux est l'étude de l'influence de l'endommagement des mèches sur les propriétés induites concernant le mouillage. En effet, des études préliminaires menées dans le cadre de cette thèse ont montré que la modification de la morphologie de la mèche (aspect pileux dû aux filaments rompus) pouvait entraîner une modification de l'angle de contact et de la dynamique du mouillage entre l'enchevêtrement complexe de fibres (constituant la mèche) et le liquide considéré.

Références

x

- [1] M. CHATAIN, "Matériaux composites : présentation générale," *Techniques de l'ingénieur*, 2001.
- [2] KURZ W., ZAMBELLI G. MERCIER J.P., *Introduction à la science des matériaux*.: PPUR presses polytechniques, 1999.
- [3] A. SHINDO, "Report 317," 1961.
- [4] G DUPUET, "Fibres de carbone," *Techniques de l'ingénieur*, p. Ref AM5134, 2008.
- [5] C. LE BACLE, R. VINCENT, M. GUIMON, F. ROOS S. PETTIT MOUSSALLY, "Les fibres de carbone et de graphite : Elements pour une évaluation du risque," *INRS, Documents pour le médecin du travail*, no. 92, 2002.
- [6] Y. HUANG, C. ZHANG, G. CHEN Z. XU, "Influence of rare earths treatment on interfacial properties of carbon/epoxy composites," *Materials Science and Engineering*, no. 444, pp. 170-177, 2007.
- [7] R J DIEFENDORF and E TOKARSKY, "High-performance carbon fibers," *Polymer Eng. Sci.*, vol. 3, no. 15, pp. 150-159, 1975.
- [8] PHILLIPS, WATT JOHNSON, "Fibres de carbone orientées," n°1110791, Avril 1964.
- [9] D.D. EDIE, "The effect of processing on the structure and properties of carbon fibers," vol. 36, no. 4, pp. 345-362, 1998.
- [10] Y. YOUNG, R.J. HUANG, "Effect of fiber microstructure upon the modulus of PAN and pitch-based carbon fibers," vol. 33, Issue 2, pp. 97-107, 1995.
- [11] M J ENDO, "Structure of mesophase pitch-based carbon fibres," *Journal of Materials Science*, vol. 2, no. 23, pp. 598-605, 1988.
- [12] M., A. OBERLIN, G. DESARMOT GUIGON, "Microtexture and structure of some high tensile strength, PAN-base carbon fibres," *Fibre Science and Technology*, vol. 20, no. 1, pp. 55-72, 1984.

- [13] L. CARAMARO, "Fibres et fils à usage technique," *Science de l'ingénieur*, 2005.
- [14] HEXCEL CORPORATION, Sizings available with HexTow (R) Continuous Carbon Fiber Products, 2013.
- [15] NF EN ISO 10618, "Carbon fibre - Determination of tensile properties of resin-impregnated yarn," 2005.
- [16] TORAY Carbon Fibers America, Inc, Technical product data sheet, 2013.
- [17] BERTHEREAU A. DALLIES E., "Fibres de verre de renforcement," *Techniques de l'ingénieur*, 2008.
- [18] BARDONNET P., "Résines époxydes (EP) - Composants et propriétés," *Techniques de l'ingénieur*, 1992.
- [19] D. L CHUNG, *Carbon Fibers.*: Butterworth-Heinemann, 1994.
- [20] D.L. CHUNG, "Materials for thermal conduction," *Applied thermal engineering*, no. 21, pp. 1593-1605, 2001.
- [21] E. AOKI K. FUKUTA, "3D fabrics for structural composites," in *Proceeding of the 15th Textile Research Symposium*, Philadelphia, PA, 1986.
- [22] G. NEMOZ, "Textures textiles tridimensionnelles," *Techniques de l'ingénieur*, 2003.
- [23] D. WEIDMANN, *Aide-mémoire Textiles techniques*, Dunod, Ed., 2010.
- [24] L. CARAMARO, "Textiles à usage technique," *Techniques de l'ingénieur*, 2006.
- [25] K.H. LEONG, I. HERZBERG B. LEE, "Effect of weaving on the tensile properties of carbon fibre tows and woven composites," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, no. 20, pp. 652-670, 2001.
- [26] G. DUSSERRE, G. BERNHART L. BALEA, "Composites à renfort tricoté : Relations entre contexture, nature du renfort et propriétés mécaniques du composite infusé," in *Comptes-rendus des JNC 17*, Poitiers, 2011.
- [27] K.H. LEONG, I. HERSZBERG, H. HAMADA O.A. KHONDKER, "Impact and compression after-impact performance of weft-knitted glass textile composites," *Composites Part. A*, no. 36, pp.

638-648, 2005.

- [28] J.V. RISICATO, Optimisation de l'architecture des fils dans une structure textile 3D pour le renforcement de pièces composites, 2012, Thèse soutenue à Lille 1, sous la direction de V. Koncar.
- [29] L TONG, A P MOURITZ, and M K BANNISTER, *3D Fibre reinforced polymer composites*.: Elsevier, 2002.
- [30] I. HERZSBERG P. J. FALZON, "Mechanical performance of 2-D braided carbon/epoxy composites," *Comp. Sci. Tech.*, no. 58, pp. 253-265, 1998.
- [31] L. GORNET. (2008) Généralités sur les matériaux composites. Document de cours EC Nantes.
- [32] M. TROVALET, Sur un modèle micro pour le calcul des structures en composites stratifiés, Mars 2010, Thèse de doctorat soutenue à Cachan, sous la direction de P. Ladevèze.
- [33] N. TAKEDA F.M. ZHAO, "Effect of interfacial adhesion and statistical fiber strength on tensile strength of unidirectional glass fiber epoxy composites," *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 31, no. 11, pp. 1215-1224, 2000.
- [34] C S YERRAMALLI and A M WAAS, "A failure criterion for fiber reinforced polymer composites under combined compression-torsion loading," *International Journal of Solids and Structures*, no. 40, pp. 1139-1164, 2003.
- [35] A. ARGON, "Fracture of composites," *Treatise on Materials Science and Technology Academic Press*, no. 1, pp. 79-114, 1972.
- [36] F. HILD, Endommagement, rupture et changements d'échelles dans les matériaux hétérogènes, 1998, Mémoire d'habilitation à diriger des recherches.
- [37] T. RISSON, Comportement en fluage de composites à renfort carbone et matrices époxydes et peek, 1998, Thèse soutenue à l'EC Lyon, sous la direction de M. Salvia.
- [38] A. CHATEAUMINOIS. (Octobre, 2012) Statistique de la rupture de renforts fibreux fragiles. Document de cours ESPCI ParisTech.
- [39] W. WEIBULL, "A statistical distribution function of wide applicability," *Journal of applied mechanics*, no. 18, pp. 293-296, 1951.

- [40] A. MARCELLAN, "Microstructures, micromécanismes et comportement à rupture de fibres PA 66," Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Paris, Thèse de doctorat 2003.
- [41] R. MAIRE, C. GAUTHIER, S. YOUSSEF, P. CLOETENS, H.D. WAGNER D. RAZ-BEN AROUSH, "A study of fracture of unidirectional composites using in situ high-resolution synchrotron X-ray microtomography," *Composites Science and Technology*, no. 66, pp. 1348-1353, 2006.
- [42] B.W. SMITH, "Fractography for continuous fiber composites," *Engineered Materials Handbook*, vol. I, pp. 786-793, 1993.
- [43] F. MOUSSY F. MONTHEILLET, *Physique et mécanique de l'endommagement.*: EDP Sciences, 2012.
- [44] F. TOUCHARD, L. CHOCINSKI-ARNAULT, C. DEVER, G. ALISE C. BONNAFOUS, "Analyse multi-échelle des mécanismes d'endommagement de composites chanvre/époxy par émission acoustique," in *JNC16*, Toulouse, 2009.
- [45] C. THIERY, "Tomographie à rayons X," *Techniques de l'ingénieur*, 2013.
- [46] P. BADEL, "Analyse mésoscopique du comportement mécanique des renforts tissés de composites utilisant la tomographie aux rayons X," INSA, Lyon, Thèse de doctorat 2008.
- [47] INRS, "Comptage des fibres par microscopie en contraste de phase," Fiche 054/V01.02, 28/03/2008.
- [48] F. HILD, "De la rupture des matériaux à comportement fragile," Thèse de doctorat, soutenue à l'Université Paris 6 1992.
- [49] J. DUMONT-FILLON, "Contrôle non destructif (CND)," *Techniques de l'ingénieur*, 1996.
- [50] K. EDELMANN, U. TILTMANN M. SCHNEIDER, "Quality analysis of reinforcement structures for composites by digital image processing," in *25th International SAMPE Europe Conference*, Paris, 2004.
- [51] AFNOR, Norme NF EN ISO 1889:2009-10, 2009.
- [52] AFNOR, ISO 10548:2002 méthode A, 2002.
- [53] AFNOR, ISO 10548:2002 méthode C, 2002.

- [54] C. BUDNIK, "Essais non-destructifs - Contrôle par ultrasons," *Techniques de l'ingénieur*, 1997.
- [55] V.B., KOTHARI, V.K. GUPTA, *Manufactured fibre technology*.: Chapman&Hall, 1997.
- [56] USTER, USTER TESTER 5-C800 Sales Presenter, 2005.
- [57] F. BOUSSU, V. KONCAR, D. SOULAT N. TRIFIGNY, "Dynamic in-situ measurements of 3D composite material mechanical constraints during the weaving process," in *4th World Conference on 3D Fabrics and their Applications*, Aachen, 2012.
- [58] F. KELLY, C. COCHRANE, F. BOUSSU, V. KONCAR, D. SOULAT N. TRIFIGNY, "PEDOT:PSS-based piezo-resistive sensors applied to reinforcement glass fibres for in-situ measurement during the composite material weaving process," *Sensors*, vol. 13, no. 8, pp. 10749-10764, August 2013.
- [59] N. GODIN et al. F. PHILIP, "Caractérisation des endommagements d'un composite Carbone/PA12 par émission acoustique," in *JNC 17*, Poitiers, 2011.
- [60] M.A, BIGUE, L. BUENO, "Profilo-pilosimètre pour matériaux fibreux souples," , Grenoble, 2007.
- [61] M. RIDOUX, *AMDEC - Moyen*, Techniques de l'Ingénieur, Ed., 1999.
- [62] Y. MOUGIN, *Processus : les outils d'optimisation de la performance*, Eyrolles, Ed., 2011.
- [63] F. BOUSSU, *Le tissage*., 2007.
- [64] M. H. MOHAMED P. R. LORD, *Weaving : Conversion of yarn to fabric*, 2nd ed., Merrow Technical Library, Ed., 1982.
- [65] W. S. SONDHELM A. ORMEROD, *Weaving : Technology and Operations*, The Textile Institute, Ed., 1995.
- [66] Lindauer DORNIER GmbH, Brochure d'information métier PS - Type Franz Druck, 2008.
- [67] Lindauer DORNIER GmbH, Brochure d'information métier PX, 2008.
- [68] A. LECA, Photo interne ENSAIT Gemtex, Roubaix, 2013.

- [69] L GENDRE, B SOULIER, and A SAVARY, "Les plans d'expérience," *Sciences de l'Ingénieur*, 2009.
- [70] L. CREIGHTON J. GOUPY, *Introduction aux plans d'expérience*, 3rd ed.: Dunod, 2006.
- [71] Documentation Minitab 16,.
- [72] Y. EL-MOGAHZY, "Structure and mechanics of yarns," *Structure and Mechanics of Textile Fibre Assemblies*, 2008.
- [73] J.W.S, GROSSBERG. P., BACKER, S. HEARLE, "Structural Mechanics of Fibers," *Yarns and Fabrics*, 1969.
- [74] SACMA, "Recommanded Method for TOW TENSILE TESTING OF CARBON FIBERS," SRM 16R-94, 1994.
- [75] A.P. MOURITZ, L. LEE S. RUDOV-CLARK, "Fibre damage in the manufacture of advanced three dimensional woven composites," *Composites Part A*, vol. 34, no. 10, pp. 963-970, 2003.
- [76] S. ALAOUI, G. HIVET, E. BLOND J.E. ROCHER, *Experimental characterization of the tensile behavior of a polypropylene/glass 3D-fabric : from the yarn to the fabric.*, 2012.
- [77] Minitab. Guide statistique.
- [78] NIST/SEMATECH, *Handbook of Statistical Methods.*, April 2012.
- [79] M. VORESCHOVSHKY, M. KONRAD R. CHUDоба, "Stochastic modeling of multi-filaments yarns. I. Random properties within the cross-section and size effects," *International Journal of Solids and Structures*, no. 43, pp. 413-434, 2006.
- [80] D. DURVILLE, "Microscopic approaches for understanding the mechanical behaviour of reinforcement in composites," in *Composite Reinforcements for Optimum Performance.*: Elsevier, Woodhead Publishing in Materials, 2011.
- [81] R. CHUDоба M. VORESCHOVSKY, "Stochastic modeling of mutli-filaments yarns : II. Random properties over the length and size effect," *International Journal of Solids and Structures*, no. 43, pp. 435-458, 2006.
- [82] L.H.C. TIPPETT R. A. FISHER, "Limiting forms of the frequency ditribution of the largest and smallest member of a sample," *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, no. 24,

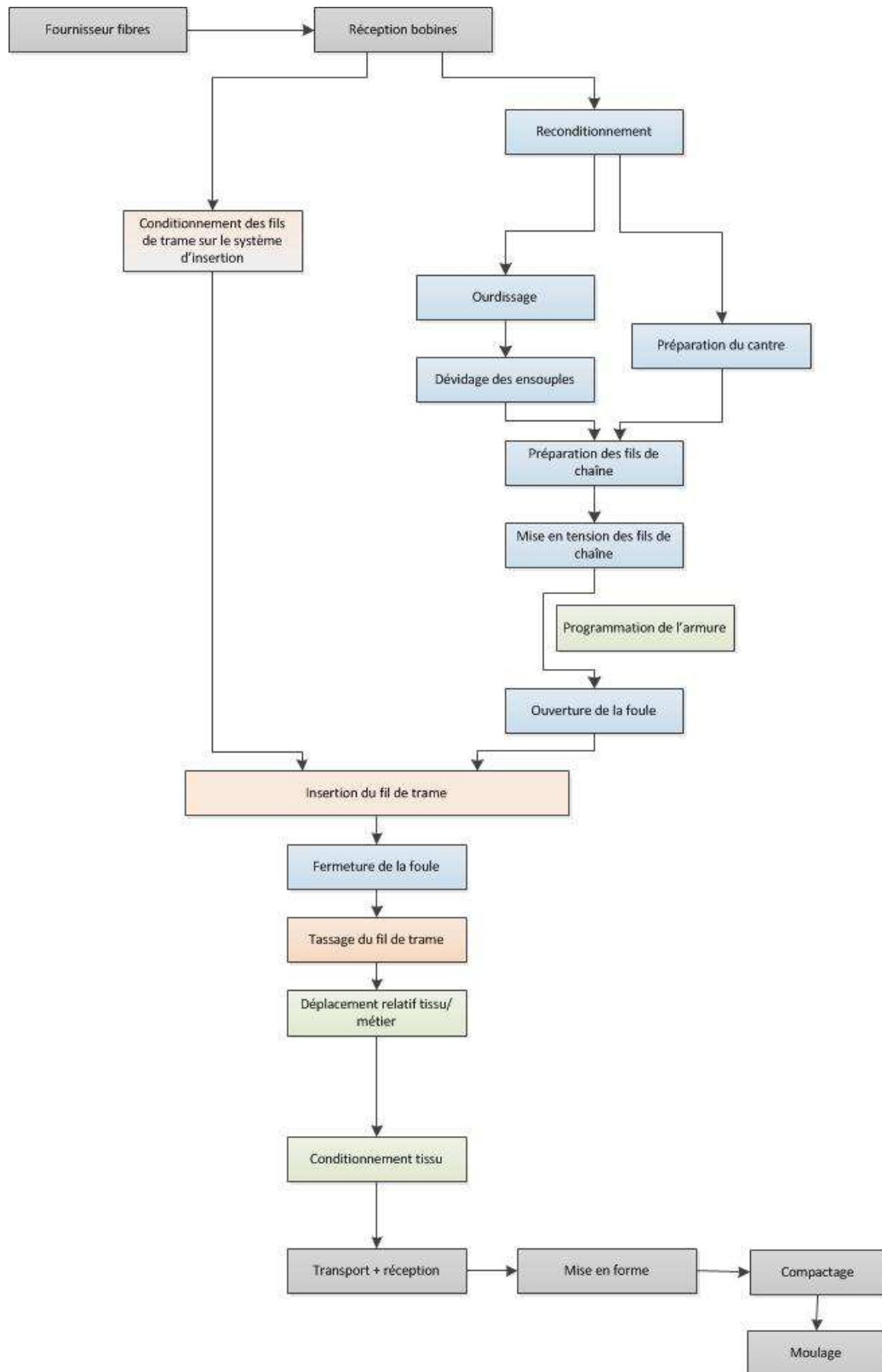
pp. 180-190, 1928.

- [83] W. WEIBULL, "Phenomenon of Rupture in Solids," *Royal Swedish Institute of Engineering Research*, vol. 153, pp. 1-55, 1939.
- [84] H.E. DANIELS, "The statistical theory of the strength of bundles of threads," *Proceedings of the Royal Society (London)*, p. 405, 1945.
- [85] S.L. PHOENIX, "The random strength of series-parallel structures with load sharing among members," *Probabilistic Mechanics*, pp. 91-95, 1978.
- [86] S.L. PHOENIX R.L. SMITH, "Asymptotic distributions for the failure of fibrous materials under series-parallel structure and equal load-sharing," *Journal of Applied Mechanics*, no. 48, pp. 75-82, 1981.
- [87] H.M. TAYLOR S.L. PHOENIX, "The asymptotic strength distribution of a general fiber bundle," *Advances in Applied Probability*, no. 5, pp. 200-216, 1973.
- [88] C. THOMAS, Etude des mécanismes d'endommagement des composites fibres de carbone / matrice polyamide : application à la réalisation de réservoirs de stockage de gaz sous haute pression de type IV, 2011.
- [89] J.P. JERNOT, J. BREARD, M. GOMINA A. BARBULEE, "Damage to flax fibre slivers under monotonic uniaxial tensile loading," *Composites*, vol. A, no. 64, pp. 107-114, 2014.
- [90] A. DELEHOUZE, Ablation des matériaux carbonés : lien entre la nanotexturation et la réactivité, Décembre 2012, Thèse de doctorat soutenue à Bordeaux 1, sous la direction de G. VIGNOLES.
- [91] GIMP. Documentation.
- [92] HEXCELCORPORATION, "Technical Product Data Sheet, AS7,".
- [93] J.F. COUCHOT C. GUYEUX, "Traitement des images," Univ. de Franche Comté, Institut universitaire de technologie de Belfort-Montbéliard, Support de cours.

Liste des annexes

ANNEXE 1 : AMDEC ORIENTEE SANTE-MATIERE	A1
ANNEXE 2: DATA SHEET COLLE STRUCTURALE SCOTCH-WELD™ 9828 B/A	A7
ANNEXE 3: DATA SHEET HEXTOW® AS7.....	A11
ANNEXE 4 : DATA SHEET HEXTOW® IM7.....	A13

Annexe 1 : AMDEC orientée santé-matière



RECEPTION BOBINE

Fonction	Mode de défaillance potentiel	Effets potentiels de la défaillance	Criticité	Causes potentielles du mécanisme de défaillance	Fréquence	Contrôle	PARAMETRES BANC DE TEST
Réception bobine	Mauvaise référence matière	Préforme rebutée	9	Mauvaise visibilité de la référence matière	1	Contrôle BR Contrôle étiquette Contrôle CC + PV	
	Mauvais conditionnement (taille de bobine)	Difficulté à débobiner	3	Mauvaise visibilité de la matière à réception	1	Contrôle bobine	
	Quantité de matière non conforme à la commande	Retard	1		3	N/A	
	Mauvais conditionnement (pollution)	Préforme rebutée	6	Mauvaise visibilité de la matière à réception	1	Contrôle bobine	
	Mauvais conditionnement (dégradation physique)	Préforme rebutée	6	Mauvaise visibilité de la matière à réception	3	Contrôle bobine en réception Contrôle bobine en dévidage	
	Mauvais conditionnement (température, hygrométrie)	Difficulté à travailler le fil	3	Matière non testée entièrement en réception et non entièrement manipulée	1	Contrôle bobine en réception Contrôle bobine en dévidage	
	Pérémpion matière	Difficulté à travailler le fil Préforme rebutée	3	Mauvaise visibilité des CC matière à réception	6	Contrôle BR Contrôle étiquette Contrôle CC + PV Contrôle Réception	Paramètre « âge de fil »

RECONDITIONNEMENT / FILAGE

Fonction	Mode de défaillance potentiel	Effets potentiels de la défaillance	Criticité	Causes potentielles du mécanisme de défaillance	Fréquence	Contrôle	PARAMETRES BANC DE TEST
Débobinage	Mauvaise tenue du fil	Mauvais débobinage du fil et dégradation Guide fil inadapté	3	Mauvaise conditionnement initial	1		Paramètre « guide fil »
	Conditionnement bobine non adapté à l'outil	Impossible de travailler	1	Mauvaise conditionnement initial	1		
	Mauvais angle de bobinage	Mauvais débobinage du fil et dégradation	3	Mauvaise conditionnement initial	1		Paramètre « angle de bobinage »
Rembobinage	Mauvaise taille de bobine	Reconditionnement inadapté à l'outil	1	Mauvaise identification bobine	1		
	Mauvais angle de bobinage	Mauvais comportement du fil (twist, dégradation,...)	6	Mauvaise vitesse de guide fil	2		Paramètre « angle de bobinage »
	Tension du fil trop forte	Mauvais comportement du fil (twist, dégradation,...)	6	Vitesse relative de bobinage	2		Paramètre « vitesse de bobinage »
	Tension du fil trop faible	Mauvaise tenue de la bobine et difficulté à travailler le fil (twist, dégradation,...)	6	Vitesse relative de bobinage	2		Paramètre « vitesse de bobinage »
	Forts frottements du fil avec les guides fils	Dégradation du fil et rebut préforme	6	Vitesse relative de bobinage Agents agressifs Tension du fil			Paramètre « guide fil »

PREPARATION DU CANTRE

Annexe 1 : AMDEC orientée santé-matière

Fonction	Mode de défaillance potentiel	Effets potentiels de la défaillance	Criticité	Causes potentielles du mécanisme de défaillance	Fréquence	Contrôle	PARAMETRES BANC DE TEST
Préparation du cantre	Mauvais positionnement des bobines	Fil bloqué Retard	3	Erreur humaine	1	1	
	Frottement important avec les oeilletons	Dégradation matière	3	Matériau non adapté Sur-tension des fils de chaîne	3	2	Paramètre « œillet du cantre »
	Support non adapté aux bobines	Retard Impossibilité d'installer les bobines et donc de tisser	2	Mauvais conditionnement initial	1	1	

OURDISSAGE

Fonction	Mode de défaillance potentiel	Effets potentiels de la défaillance	Criticité	Causes potentielles du mécanisme de défaillance	Fréquence	Contrôle	PARAMETRES BANC DE TEST
Ourdisage	Mauvaise mise en place de l'ourdissoir	Non maîtrise du parallélisme Non maîtrise de la tension	3	Support non adapté ou déformant	1		
	Mauvaise mise en place des bobines	Mauvaise sortie du fil (dégradation) Sortie de la bobine de son support	3	Support non adapté ou déformant	1		
	Mauvaise maîtrise du parallélisme des fils	Retard Rebut ensouple		Vitesse de l'ourdissoir non adaptée			Paramètre « frottement entre mèches »
	Mauvaise maîtrise de la tension des fils « individuellement »	Retard Rebut ensouple					Paramètre « tension d'ourdisage »
	Forts frottements du fil avec les guides fils	Dégradation du fil et rebut préforme		Vitesse de l'ourdissoir trop élevée			Paramètre « vitesse de rotation de l'ourdissoir »
	Forts frottements du fil avec les outils de mise sous tension des fils	Dégradation du fil et rebut préforme	6	Support métallique non adapté Frottement avec les sangles			Paramètre « sangles de l'ourdissoir »

PROGRAMMATION DE L'ARMURE

Fonction	Mode de défaillance potentiel	Effets potentiels de la défaillance	Criticité	Causes potentielles du mécanisme de défaillance	Fréquence	Contrôle	PARAMETRES BANC DE TEST
Programmation de l'armure							
	Erreur lors de la numérotation du dutage	Erreur dessin Rebut préforme	4	Erreur humaine	1		
	Erreur lors de la numérotation des fils de chaîne	Erreur dessin Rebut préforme	4	Erreur humaine	1		
	Erreur lors de la retranscription dans le logiciel	Erreur dessin Rebut préforme	4	Erreur humaine	1		

TISSAGE

Fonction	Mode de défaillance potentiel	Effets potentiels de la défaillance	Criticité	Causes potentielles du mécanisme de défaillance	Fréquence	Contrôle	Action
FIL DE CHAÎNE							
Dévidage des ensouples	Fil rentré à l'intérieur de l'ensouple	Fil bloqué	6	Sur-tension sur certains fils de chaîne	4		Paramètre « frottements entre mèches à travers une nappe solide »
		Dégradation des autres fils					
		Irrégularités de tension entre les fils de chaîne					
Préparation des fils de chaîne	Erreur de rentrage (Le fil est inséré dans la mauvaise lice ou n'est pas inséré du tout ou plusieurs fils sont insérés dans la même lice)	Erreur de dessin	8	Erreur humaine	3	Visuel	Paramètre "manipulation opérateur"
		Retard et dégradation fil si détecté					
		Rebut préforme si non détecté					
	Erreur de piquage (Le fil est inséré dans la mauvaise broche du peigne)	Impossibilité de tisser	7	Erreur humaine	3	Visuel	Paramètre "frottements entre mèches"
		Forte dégradation matière					
		Rebut préforme					
Mise en tension des fils	Les fils de chaîne ne sont pas assez tendus	Les fils de chaîne ne sont pas sélectionnés lors de l'ouverture de la foule	6	Irrégularités de consommation des fils de chaîne suivant le dessin (armure) (Différences de diamètres d'ensouple)	5	Contrôle urs de tension	Paramètre "tension du fil lors du tissage"
		Rebut préforme					
	Un ou plusieurs fils de chaîne sont trop tendus	Risque de casse	6	Irrégularités de consommation des fils de chaîne suivant le dessin (armure)	4	Contrôle urs de tension	Paramètre "tension du fil lors du tissage"
		Retard si détecté					
		Rebut si non détecté					
	Un ou plusieurs fils casse(nt)	Retard + dégradation par l'opérateur si détecté	7	Irrégularités de consommation des fils de chaîne suivant le dessin (armure)	3	Déecteurs de casse-fil	Paramètre "tension du fil lors du tissage" + Paramètre "manipulation par l'opérateur"
		Rebut préforme si non détecté					
Ouverture de foule	Montée du mauvais cadre	Erreur de dessin	6	Erreur de programmation	1	Visuel	
		Rebut préforme					

Annexe 1 : AMDEC orientée santé-matière

	Non montée de un ou plusieurs cadres sélectionnés	Non montée de nombreux fils de chaîne sélectionnés	6	Problème mécanique (cordes des cadres entrelacées)	2	Visuel	
		Erreur de dessin					
		Rebut préforme					
	Frottement avec les lices	Dégradation matière	3	Lices trop « agressives » + Sur tension des fils de chaîne	4		Paramètre « lice »
	Non montée de un ou plusieurs fils sélectionnés	Erreur de dessin	8	Sous-tension de certains fils de chaîne (cf. mise en tension des fils)	7	DéTECTEURS de présence	Paramètre "impact de l'insertion trame sur un fil de chaîne"
		Foule non dégagée (dégradation matière)					
Rebut préforme							
FIL DE TRAME							
Reconditionnement/Filage	Mauvaise taille de bobine	Reconditionnement inadapté à l'outil	1	Mauvaise identification bobine	1		
	Mauvais angle de bobinage	Mauvais comportement du fil (twist, dégradation,...)	6	Mauvaise vitesse de guide fil	2		Paramètre « angle de bobinage »
	Tension du fil trop forte	Mauvais comportement du fil (twist, dégradation,...)	6	Vitesse relative de bobinage	2		Paramètre « vitesse de bobinage »
	Tension du fil trop faible	Mauvaise tenue de la bobine et difficulté à travailler le fil (twist, dégradation,...)	6	Vitesse relative de bobinage	2		Paramètre « vitesse de bobinage »
	Forts frottements du fil avec les guides fils	Dégradation du fil et rebut préforme	6	Vitesse relative de bobinage			Paramètre « guide fil »
				Agents agressifs			
Tension du fil							
Insertion fil	Foule non dégagée	RAFLE	9	Non montée de un ou plusieurs fils sélectionnés (cf. ouverture de foule)	3	DéTECTEURS de présence	Paramètre "impact de l'insertion trame sur un fil de chaîne" (vitesse + mode d'insertion)
	Sur tension du fil de trame	Rétrécissement de la laize (dégradation des fils en lisière lors du tassage + Irrégularités de densité entre le milieu du tissu et les bords)	6	Vitesse d'insertion de la trame trop élevée	2	Contrôleurs de tension	
TISSU							
Fermeture foule	Non descente de un ou plusieurs cadres	Dégradation de nombreux fils de chaîne lors du tassage	6	Problème mécanique (mécanisme de montée/descente des cadres bloqué)	1	Visuel	Paramètre "frottement des dents du peigne sur un fil de chaîne isolé"
	Non descente de un ou plusieurs fils de chaîne	Dégradation de un ou plusieurs fils de chaîne lors du tassage	6	Sous-tension de certains fils de chaîne	1	Visuel	Paramètre "frottement des dents du peigne sur un fil de chaîne isolé"
Tassage	Le peigne ne parvient pas jusqu'au tissu	Irrégularités de densité des fils de trame (problème de duitage)	6	Sous tension du système de tassage	1	Régulateurs de tension	
	Le peigne tasse trop fortement le fil de trame	Forte dégradation matière	7	Sur tension du système de tassage	2	Régulateurs de tension	Paramètre "impact du peigne sur le tissu" (vitesse + forme et matériau des dents)
		Irrégularités de densité des fils de trame (problème de duitage)					
		Marquage du tissu					
		Rebut préforme					
Frottement avec les dents du peigne	Dégradation matière	3	Sur tension des fils de chaîne	4		Paramètre « dent du peigne »	
Formation lisière	?						
Déplacement du MaT	Déplacement relatif tissu/métier trop important	Sur tension des fils de chaîne	5	Vitesse relative de tissage / avancement tissu trop faible	2	Contrôleurs de tension	
		Dégradation du tissu (marquage)					

Annexe 1 : AMDEC orientée santé-matière

	Déplacement relatif tissu/métier trop faible	Sous tension des fils de chaîne	6	Vitesse relative de tissage / avancement tissu trop important	1	Contrôle urs de tension	
		Les fils de chaîne ne sont pas sélectionnés lors de l'ouverture de la foule					
		(cf. Mise en tension des fils de chaîne)					
Finalisation / Préparation conditionnement	Lisière insuffisante lors de la découpe du tissu	Perte de certains fils de chaîne sur les bords du tissu	8	Lisière pas assez tendue Bouclettes trop courtes	1		
	Mauvaise découpe du tissu	Désolidarisation de certains fils de trame (irrégularités de duitage)	8	Espace insuffisant entre la coupe des fils de chaîne et le tissu	1		
	Pli du tissu lors du conditionnement	Marquage du tissu	8	Mauvaise manipulation	1	Visuel	
		Rebut préforme					

Annexe 2: Data sheet colle structurale Scotch-Weld™ 9828 B/A



Scotch-Weld™ 9323 B/A

Colle Structurale

Fiche technique

Octobre, 2010
Dernière version : Mai 1999

Description du produit	La colle 3M Scotch-Weld™ 9323 B/A est un produit bicomposants thixotrope offrant les propriétés suivantes : Polymérisation à une température de 20-25°C, mais peut être accélérée par une légère cuisson. Les assemblages une fois polymérisés possèdent de bonnes performances à la chaleur et sont tenaces. Les assemblages, une fois polymérisés, conservent remarquablement leurs performances après vieillissement en milieu hostile. Excellente résistance au pelage. Possède un temps de travail étendu qui permet le conditionnement en cartouche SEMKIT. La colle, une fois mélangée, s'écoule lentement, ce qui permet une application aisée.		
Propriétés physiques moyennes	(ceci n'est pas une spécification)		
		Base : 9323 B	Accélérateur : 9323 A
	Couleur Base	blanc crème résine époxyde modifiée	Rouge amines – modifiés
	Densité	1,18	1,06
	Consistance	pâte thixotrope	Gel
	Rapport de mélange de poids	100	27
	Rapport de mélange en volume	100	30
	Temps de travail à 23°C ± 2 pour 50 g de mélange	150 mn pour 50 g de mélange 120 mn pour 130 g de mélange 60 mn pour 160 g de mélange	
Performances du produit	Les résultats suivants ont été obtenus dans les laboratoires 3M dans des conditions déterminées. Les méthodes d'application générales et procédures d'assemblage sont décrites ci-après : Ces résultats sont des valeurs typiques obtenues avec la XA 9323 B/A lors d'assemblages testés au cisaillement et au pelage en T. 1.Résistance au cisaillement Les échantillons utilisés pour le test au cisaillement ont été constitués selon la méthode ASTM D 102-75 à partir de deux plaques d'aluminium 2024 T3 plaqué, d'une épaisseur de 1,6 mm, les surfaces sont préparées à l'aide de la méthode de décapage FDL décrite cidessous. Les éprouvettes sont tractées à la vitesse de 2,54 mm/min. Épaisseur du cordon de colle : 100 à 200 microns.		

3M™ Scotch-Weld 9323 B/A

Mélange et application de la colle	Lire attentivement les précautions d'emploi qui s'appliquent à ce produit :		
	Proportion du mélange		
		Poids	Volume
	Base B (blanc crème)	100	100
	Durcisseur A (rouge)	27	30
	Prendre soin de bien mélanger la colle jusqu'à l'obtention d'une couleur uniforme. Un bon mélange est important pour obtenir les meilleurs résultats de ce produit.		
	Temps de travail Le temps de travail à 23°C pour 50 g de mélange est d'environ 2 h 30. Le temps de travail du mélange sera allongé en réduisant la température ou la quantité de colle et sera raccourci par une température plus élevée ou une quantité plus importante de colle. Exemple : 50 g de mélange temps de travail : 2 h 30 127 g de mélange : 2 h 30 150 g de mélange : 1 h 00 Attention : le mélange génère de la chaleur.		
	Application Le mélange peut être appliqué à l'aide d'une spatule, d'un couteau ou de matériel d'extrusion adéquat.		
	Nettoyage L'excédent de colle non polymérisé, ainsi que l'équipement se nettoient avec des solvants de type cétonique*. * Lors de l'utilisation de solvant, éteindre toutes sources d'ignition proches et respecter les précautions d'emploi appropriées pour l'utilisation de tels matériaux.		
	Cycle de polymérisation – Pression de collage : Une pression permettant de maintenir les pièces en position pendant toute la durée du cycle est suffisante pour permettre l'étalement de la colle sur toute la surface à encoller et éviter la distorsion et l'expansion thermique des pièces collées. Les résultats reportés dans le paragraphe "performances du produit" ont été obtenus avec une pression de collage de 10 à 20 kPa. – Durée et température de polymérisation : Les durées et températures de polymérisation ci-dessous ont été utilisées pour obtenir les valeurs typiques développées dans le paragraphe "Performances du produit". Le produit atteint des performances structurales [> 7 MPa] après 4 heures à température ambiante, toutefois la polymérisation est pratiquement totale après 24 h à 23°C et le produit atteint ses performances optimales après : 15 jours à 23°C \pm 2°C 2 h à 65°C \pm 5°C 24 h à 23°C \pm 2°C + 1 heure à 30°C		
Conditions de stockage	Stocker le produit à $\pm 23^\circ\text{C}$ pour une durée de vie maximale. Assurer une rotation de stock sur la base "premier entré-premier sorti". Sur demande, votre attaché commercial Département Techniques Adhésives Industrielles pourra vous indiquer la durée de vie du produit prévue dans vos conditions de stockage.		
Précautions d'emploi	Base et durcisseur contiennent respectivement résines époxydes et amines. Les parts A et B sont irritantes pour la peau et les yeux et peuvent entraîner une sensibilisation par contact avec la peau. Le contact direct avec les yeux, de la partie A - durcisseur - risque de provoquer de graves lésions oculaires. La partie A est nocive en cas d'ingestion. – Éviter l'inhalation et le contact avec les yeux des particules et poussières pouvant être créées par l'abrasion ou l'usinage du produit polymérisé.		

3M™ Scotch-Weld 9323 B/A

Unité = KJ/cm2

Module de cisaillement/arrachement à 23°C (ASTM DG 38-64T/ASTM-DG95)

Les propriétés ont été obtenues sur un lot de Scotch Weld 9323 après une cuisson de 2 heures à 65°C ± 2°C sous une pression de 100 KPa.

- Module d'Young = 2870 MPa
- Module de cisaillement = 1070 MPa
- Coefficient de poisson = 0,37

Module d'arrachement

(Pendule de torsion AFNOR NFT 51-034)

Les caractéristiques ont été déterminées sur un lot de 9323 après une cuisson de 2 heures à 65°C ± 2°C sous une pression de 100 KPa

Température du test	Module d'Young (MPa)
- 40°C ± 3°C	3302 +/- 246
+ 23°C ± 2°C	2133 +/- 144
- 70°C ± 2°C	1502 +/- 144

Cycle de polymérisation

	15 jours à T° ambiante	24 heures à T° ambiante + 1 h à 80°C	2 h à 65°C
Valeur de l'impact en KJ/cm2	17,4 ± 4,4	28,7 ± 3,3	32,2 ± 3,2

Application du produit

Afin d'obtenir les performances nécessaires pour un bon assemblage, ainsi que leur reproductivité, le respect des conditions de mise en oeuvre est aussi important que le choix de l'adhésif ou la géométrie du joint.

D'une mauvaise application de la colle, peut découler une défaillance partielle ou totale de l'assemblage.

La colle 9323 B/A donnera d'excellents résultats sous diverses conditions d'application. Les performances du produit décrites plus haut, ont été obtenues en respectant les conditions de mise en oeuvre suivantes :

Si d'autres méthodes d'application sont envisagées, il est recommandé de vérifier, au préalable, qu'elles permettent d'obtenir les résultats recherchés.

Préparation de surface

Afin d'obtenir les performances maximales du produit, il est nécessaire de l'appliquer sur des surfaces parfaitement propres, sèches et non grasses. Une méthode de nettoyage donnant une surface parfaitement mouillable à l'eau est généralement satisfaisante. Les préparations de surface doivent être complètement évaluées avec la colle, particulièrement si la résistance à un environnement spécial est recherché.

Recommandations pour le nettoyage de l'aluminium

- Dégraissage alcalin - par exemple Oakite n°164 en solution à 10 % dans l'eau pendant 10 à 20 minutes à 85°C ± 5°C, et rinçage à l'eau immédiat et abondant.
- Traitement sulfochromique pendant 10 minutes à 65°C ± 3°C dans des solutions suivantes :

Décapage FPL (pour faire 1 l)

Acide sulfurique concentré : 332 g

Bichromate de sodium : 44,8 g

Eau distillée : ajouter pour faire 1/1,5 g

2024 T3 aluminium dégraissé percé au foret.

Précaution : utiliser un masque respiratoire adéquat et une protection pour la peau lors de l'utilisation des solutions acides.

Rincer les plaques à l'eau courante déionisée.

Sécher 15 minutes à l'air puis 10 mn en étuve à 65°C ± 5°C. Il est conseillé d'effectuer le collage ou l'application d'un primaire dans les 4 h qui suivent la préparation de surface.

3M™ Scotch-Weld 9323 B/A

	<ul style="list-style-type: none"> – En cas de contact avec la peau, laver à l'eau et au savon. – Nettoyer les vêtements souillés avant de les remettre. – Éviter de respirer les vapeurs pendant la manipulation et la polymérisation du produit. – Éviter le contact avec la peau et les yeux. <p>En cas d'ingestion, ne pas faire vomir. Faire boire deux verres d'eau et appeler d'urgence un médecin.</p> <ul style="list-style-type: none"> – Porter un vêtement de protection, des gants et des lunettes pendant l'utilisation.
Informations additionnelles	Pour toute demande d'information additionnelle, contacter l'adresse ci-dessous. Fiches de données et de sécurité : http://www.quickfds.fr
Remarques importantes	<p>Les informations et données techniques contenues dans cette fiche technique sont basées sur des essais effectués en toute bonne foi. Cependant, il s'agit de résultats moyens qui ne peuvent être utilisés en tant que spécification. De nombreux facteurs peuvent affecter les performances d'un produit 3M sur une application donnée, comme les conditions dans lesquelles le produit est appliqué ainsi que les conditions environnementales et délais dans lesquels on attend une performance du produit. Puisque ces facteurs dépendent de l'utilisateur, nous recommandons donc à nos utilisateurs :</p> <ul style="list-style-type: none"> • De réaliser des essais industriels dans les conditions exactes de l'application envisagée, et de s'assurer que notre produit satisfait à ces contraintes ; • De nous consulter préalablement à toute utilisation particulière. <p>Les conditions de garantie de ce produit sont régies par nos conditions générales de vente, les usages et la législation en vigueur.</p>

3M France
Département Solutions colles et adhésifs pour l'industrie
Boulevard de l'Oise, 95006 Cergy Pontoise Cedex
Téléphone : 01 30 31 62 64 – Fax : 01 30 31 78 62

Site : <http://www.3m.fr/collesetadesifs>

Pour toutes informations sur les autres produits 3M



Annexe 3: Data sheet HexTow® AS7



HexTow® AS7 carbon fiber is a continuous, high strength, high strain, PAN based fiber available in 12,000 (12K) filament count tows. This fiber has been surface treated and can be sized to improve its interlaminar shear properties, handling characteristics, and structural properties, and is suggested for use in weaving, prepregging, filament winding, braiding, and pultrusion.

Typical Fiber Properties	U.S. Units	SI Units
Tensile Strength	700 ksi	4,830 MPa
Tensile Modulus (Chord 6000-1000)	35.0 Msi	241 GPa
Ultimate Elongation at Failure	1.8%	1.8%
Density	0.0647 lb/in ³	1.79 g/cm ³
Weight/Length 12K	44.8 x 10 ⁻⁶ lb/in	0.800 g/m
Approximate Yield 12K	1,860 ft/lb	1.25 m/g
Tow Cross-Sectional Area 12K	6.93 x 10 ⁻⁴ in ²	0.45 mm ²
Filament Diameter	0.271 mil	6.9 microns
Carbon Content	94.0%	94.0%
Twist	Never Twisted	Never Twisted

Typical HexPly 8552 Composite Properties (at Room Temperature)	U.S. Units	SI Units	Test Method
0° Tensile Strength	370 ksi	2,550 MPa	ASTM D3039
0° Tensile Modulus	21.0 ksi	145 GPa	
0° Tensile Strain	1.6%	1.6%	
0° Short Beam Shear Strength	18.5 ksi	128 MPa	ASTM D2344
0° Compressive Strength	270 ksi	1,862 MPa	ASTM Mod. D695
Fiber Volume	60%	60%	

© Copyright Hexcel Corporation

*HexTow, Hexcel and the Hexcel logos are registered trademarks of Hexcel Corporation, Stamford, Connecticut.



**HexTow® AS7***Product Data***Carbon Fiber Certification**

This carbon fiber is manufactured to Hexcel aerospace specification HS-CP-4000 or Hexcel industrial grade specification HS-CP-3000. Copies of these specifications are available upon request. A Certification of Analysis will be provided with each shipment of HS-CP-4000 fiber. A Certificate of Conformance will be provided with each shipment of HS-CP-3000 fiber.

Available Sizing

Sizing compatible with various resin systems, based on application are available to improve handling characteristics and structural properties. Please see additional information on available Sizes on our website or contact our technical team for additional information.

Packaging

Standard packaging of HexTow® AS7 is as follows:

Filament Count	Nominal Weight		Nominal Length	
	(lb)	(kg)	(ft)	(m)
12K	8.0	3.6	14,880	4,540

Other package sizes may be available on request. The fiber is wound on a 3-inch ID by 11-inch long cardboard tube and overwrapped with plastic film.

Safety Information

Obtain, read, and understand the Material Safety Data Sheet (MSDS) before use of this product.

Important

Hexcel Corporation believes, in good faith, that the technical data and other information provided herein is materially accurate as of the date this document is prepared. Hexcel reserves the right to modify such information at any time. The performance values in this data sheet are considered representative but do not and should not constitute specification minima. The only obligations of Hexcel, including warranties, if any, will be set forth in a contract signed by Hexcel or its Hexcel's then current standard Terms and Conditions of Sales set forth on the back of Hexcel's Order Acknowledgement.

For more information

Hexcel is a leading worldwide supplier of composite materials to aerospace and other demanding industries. Our comprehensive product range includes:

- Carbon Fiber
- RTM Materials
- Honeycomb Cores
- Carbon, Glass, Aramid and Hybrid Prepregs
- Structural Film Adhesives
- Honeycomb Sandwich Panels
- Engineered Core
- Reinforcement Fabrics

For US quotes, orders and product information call toll-free 1-866-556-2662 and 1-800-987-0658. For other worldwide sales office telephone numbers and a full address list, please click here: <http://www.hexcel.com/contact/salesoffices>

Copyright © 2010 – Hexcel – All Rights Reserved

March 2010

Annexe 4 : Data sheet HexTow® IM7



HexTow® IM7 carbon fiber is a continuous, high performance, intermediate modulus, PAN based fiber available in 12,000 (12K) filament count tows. This fiber has been surface treated and can be sized to improve its interlaminar shear properties, handling characteristics, and structural properties. It is suggested for use in weaving, prepregging, filament winding, braiding, and putrusion.

The unique properties of HexTow® IM7 fiber, such as higher tensile strength and modulus, as well as good shear strength, allow structural designers to achieve both higher safety margins for both stiffness and strength critical applications.

Typical Fiber Properties	U.S. Units	SI Units
Tensile Strength		
6K	770 ksi	5,310 MPa
12K	822 ksi	5,670 MPa
Tensile Modulus (Chord 6000-1000)	40.0 Msi	276 GPa
Ultimate Elongation at Failure		
6k	1.8%	1.8%
12K	1.9%	1.9%
Density	0.0643 lb/in ³	1.78 g/cm ³
Weight/Length		
6K	12.5 x 10 ⁻⁶ lb/in	0.223 g/m
12K	25.0 x 10 ⁻⁶ lb/in	0.446 g/m
Approximate Yield		
6K	6,674 ft/lb	4.48 m/g
12K	3,337 ft/lb	2.24 m/g
Tow Cross-Sectional Area		
6K	1.94 x 10 ⁻⁴ in ²	0.13 mm ²
12K	3.89 x 10 ⁻⁴ in ²	0.25 mm ²
Filament Diameter	0.203 mil	5.2 microns
Carbon Content	95.0%	95.0%
Twist	Never Twisted	Never Twisted

Typical HexPly 8552 Composite Properties	U.S. Units	SI Units	Test Method
0° Tensile Strength	395 ksi	2,723 MPa	ASTM D3039
0° Tensile Modulus	23.8 ksi	164 GPa	
0° Tensile Strain	1.6%	1.6%	
0° Flexural Strength	270 ksi	1,862 MPa	ASTM D790
0° Flexural Modulus	22.0 Msi	152 GPa	
0° Short Beam Shear Strength	18.5 ksi	128 MPa	ASTM D2344
0° Compressive Strength	260 ksi	1,793 MPa	
0° Compressive Modulus	21.2 Msi	146 GPa	ASTM Mod. D695
0° Open Hole Tensile Strength	62 ksi	427 MPa	
0° Open Hole Compressive Strength	48.8 ksi	336 MPa	ASTM D6484
90° Tensile Strength	16.1 ksi	111 MPa	ASTM D3039
Fiber Volume	60%	60%	

© Copyright Hexcel Corporation

*HexTow, Hexcel and the Hexcel logos are registered trademarks of Hexcel Corporation, Stamford, Connecticut.



**HexTow® IM7***Product Data*

Yarn/Tow Characteristics	U.S. Units	SI Units
Specific Heat	0.21 Btu/lb-°F	0.21 Cal/g-°C
Electrical Resistivity	4.9×10^{-6} ohm-ft	1.5×10^{-3} ohm-cm
Coefficient of Thermal Expansion	-0.36 ppm/°F	-0.64 ppm/°C
Thermal Conductivity	3.12 Btu/hr-ft-°F	5.40 W/m-°K

Carbon Fiber Certification

This carbon fiber is manufactured to Hexcel aerospace specification HS-CP-5000. A copy of this specification is available upon request. A Certification of Analysis will be provided with each shipment.

Available Sizing

Sizing compatible with various resin systems, based on application are available to improve handling characteristics and structural properties. Please see additional information on available Sizes on our website or contact our technical team for additional information.

Packaging

Standard packaging of HexTow® IM7 is as follows:

Filament Count	Nominal Weight		Nominal Length	
	(lb)	(kg)	(ft)	(m)
6K	2.0	0.9	13,350	4,070
12K	4.0	1.8	13,350	4,070

Other package sizes may be available on request. The fiber is wound on a 3-inch ID by 11-inch long cardboard tube and overwrapped with plastic film.

Safety Information

Obtain, read, and understand the Material Safety Data Sheet (MSDS) before use of this product.

Important

Hexcel Corporation believes, in good faith, that the technical data and other information provided herein is materially accurate as of the date this document is prepared. Hexcel reserves the right to modify such information at any time. The performance values in this data sheet are considered representative but do not and should not constitute specification minima. The only obligations of Hexcel, including warranties, if any, will be set forth in a contract signed by Hexcel or in Hexcel's then current standard Terms and Conditions of Sale as set forth on the back of Hexcel's Order Acknowledgement.

For more information

Hexcel is a leading worldwide supplier of composite materials to aerospace and other demanding industries. Our comprehensive product range includes:

- Carbon Fiber
- RTM Materials
- Honeycomb Cores
- Carbon, Glass, Aramid and Hybrid Prepregs
- Structural Film Adhesives
- Honeycomb Sandwich Panels
- Engineered Core
- Reinforced Fabrics

For US quotes, orders and product information call toll-free 1-866-556-2662 and 1-800-688-7734. For other worldwide sales office telephone numbers and a full address list, please click here: <http://www.hexcel.com/contact/salesoffices>

March 2010

Contribution à l'étude de la santé-matière de préformes carbone

Résumé

Ce travail de thèse consiste à caractériser l'endommagement subi par une mèche de carbone au cours des procédés de transformation textile, et plus particulièrement au cours du tissage des préformes pour les matériaux composites. Un protocole de caractérisation mécanique sur mèche sèche, ainsi qu'une méthode non-destructive d'analyse d'images, ont été mis au point pour quantifier cet endommagement.

Abstract

This aim of this work is to characterize the damage suffered by a carbon tow in textile processing methods, and more particularly during preforms weaving for composites materials. A mechanical characterization protocol on dry tow tensile test and a non-destructive method of image analysis, have been developed to quantify this damage.

Discipline – Mécanique des Matériaux

Mots clés – Carbone – Endommagement – Composites - Tissage - Caractérisation

Key words – Carbon fiber – Damaging – Composite materials – Weaving – Characterization

Laboratoire d'accueil

Laboratoire de Génie et Matériaux Textiles (GEMTEX)

Ecole Nationale Supérieure des Arts et Industries Textiles (ENSAIT)

2, allée Louise et Victor Champier – BP 30329 – 59056 Roubaix cedex 01